

COMMITTENTE:



RETE FERROVIARIA ITALIANA S.p.A.

DIREZIONE TERRITORIALE PRODUZIONE DI BOLOGNA

PROGETTAZIONE:



VIA INGEGNERIA S.R.L.
Via Flaminia Vecchia, 999
00189 Roma (RM) Italia
Tel.: +39 06 3327441 - Fax: +39 06 33219798
Email: via@via.it



Innovazioni territoriali e ricerche ambientali

INTERA S.R.L.
Viale Castrense, 8
00139 Roma (RM) Italia
Tel.: +39 06 70613211 - Fax: +39 0670399382
Email: segreteria@interasrl.it

A.A.SOGGETTO TECNICO: S.O. INGEGNERIA - DIREZIONE TERRITORIALE PRODUZIONE BOLOGNA

PROGETTO DEFINITIVO

Linea di Cintura di Bologna
Ponte sul fiume Reno al Km 8+383
Messa in sicurezza con risagomatura, impermeabilizzazione e risanamento

Elaborati Generali

SCALA

-

Relazione idrologico-idraulica

Foglio

1

di

1

PROGETTO/ANNO

SOTTOPR.

LIVELLO

NOME DOC.

PROGR.OP.

FASE FUNZ.
NO SISTEMA

NUMERAZ.

1 8 2 4 1 7

I 0 1

P D

T G - -

1 5

0 1

E 0 0 3

| Revis. | Descrizione | Progettista | Data | Verificato | Data | Approvato | Data | Autorizzato | Data |
|--------|-----------------|----------------|------------|------------|------------|----------------|------------|-------------|------------|
| A | Prima emissione | M. DI Girolamo | 08/11/2019 | C. Minoli | 08/11/2019 | M. Uccellatori | 08/11/2019 | E. Lolli | 08/11/2019 |
| | | - | | - | | - | | - | |
| B | Revisione | M. DI Girolamo | 03/03/2020 | C. Minoli | 03/03/2020 | M. Uccellatori | 03/03/2020 | E. Lolli | 03/03/2020 |
| | | - | | - | | - | | - | |
| C | Revisione | M. DI Girolamo | 24/09/2021 | C. Minoli | 24/09/2021 | M. Uccellatori | 24/09/2021 | E. Lolli | 24/09/2021 |
| | | - | | - | | - | | - | |
| - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | | - | | - | | - | | - | |

POSIZIONE
ARCHIVIO

LINEA

L 1 0 1

SEDE TECN.


T R 4 2 3 7

NOME DOC.

T G - -


NUMERAZ.

| Verificato e trasmesso | Data | Convalidato | Data | Archiviato | Data |
|------------------------|------|-------------|------|------------|------|
| | | | | | |
| | | | | | |


| | | |
|---|---|-----------|
|  | <i>Valutazione di compatibilità idraulica ai sensi della direttiva 2/99 della Autorità di Bacino del fiume Po del ponte ad archi sulla Linea di Cintura sul fiume Reno alla Pk 8+383 della Linea Ferroviaria Bologna-Verona</i> | Redatto: |
| Oggetto: | <i>Relazione idraulica</i> | AP |

I N D I C E

| | |
|---|-----------|
| 1. PREMESSA | 3 |
| 2. DOCUMENTAZIONE DI RIFERIMENTO | 4 |
| 2.1 Normativa | 4 |
| 2.2 Bibliografia | 4 |
| 3. INQUADRAMENTO E DESCRIZIONE DELLE OPERE | 5 |
| 3.1 Lineamenti idrologici del fiume Reno | 5 |
| 3.2 Il ponte ferroviario | 7 |
| 3.3 Caratteristiche evolutive dell'alveo nell'area di interesse | 9 |
| 3.4 La nuova soglia a protezione del ponte | 15 |
| 4. DEFINIZIONE DELLA PORTATA | 19 |
| 4.1 Portate Autorità di Bacino del fiume Po (ex Reno) | 19 |
| 4.2 Calcolo portata | 19 |
| 5. MODELLAZIONE IDRAULICHE | 22 |
| 5.1 Portate di modellazione | 22 |
| 5.2 Dettagli analisi Ante Operam | 22 |
| 5.3 Risultati analisi Ante Operam | 29 |
| 5.4 Dettagli analisi Post Operam | 36 |
| 5.5 Risultati analisi Post Operam | 38 |
| 6. CALCOLO DELLA EROSIONE IN CORRISPONDENZA DELLE PILE DEL PONTE E DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE DI PROTEZIONE | 42 |
| 6.1 Generalità | 42 |
| 6.2 Protezione a valle della soglia con scivolo in pietrame | 44 |
| 7. ALLEGATO 1 – DESCRIZIONE CODICE DI CALCOLO: HEC RAS | 46 |
| 7.1 Equazioni di base | 46 |
| 7.2 Metodo di soluzione numerica | 48 |

| | | |
|---|---|-----------|
|  | <i>Valutazione di compatibilità idraulica ai sensi della direttiva 2/99 della Autorità di Bacino del fiume Po del ponte ad archi sulla Linea di Cintura sul fiume Reno alla Pk 8+383 della Linea Ferroviaria Bologna-Verona</i> | Redatto: |
| Oggetto: | <i>Relazione idraulica</i> | AP |

| | | |
|------------|--|-----------|
| 7.3 | Approssimazioni del calcolo | 49 |
| 7.4 | Coefficiente di scabrezza | 50 |
| 7.5 | Ponti | 51 |
| 8. | ALLEGATO 2 – RISULTATI DEL MODELLO DI CALCOLO | 54 |

| | | |
|---|--|----------|
|  | Valutazione di compatibilità idraulica ai sensi della direttiva 2/99 della Autorità di Bacino del fiume Po del ponte ad archi sulla Linea di Cintura sul fiume Reno alla Pk 8+383 della Linea Ferroviaria Bologna-Verona | Redatto: |
| Oggetto: | Relazione idraulica | AP |

1. PREMESSA

La presente relazione riguarda il progetto per la realizzazione di una soglia in cls a protezione del Ponte ad archi della Linea di Cintura sul fiume Reno alla progressiva 8+383 della linea Bologna - Verona, a metà tra il comune di Bologna ed il comune di Calderara di Reno (BO).




Figura 1.1: Stralcio planimetrico con indicazione del ponte ferroviario sul fiume Reno

Il ponte in muratura ad archi, è costituito da 18 arcate di luce netta compresa tra 22.2 m e 22.6 m. e la porzione compresa tra le pile 6, 7, 8 è interessata attualmente da intensi fenomeni erosivi.

Il progetto della nuova soglia, a seguito di attento studio della morfodinamica fluviale del tratto di Reno interessato, è stato esteso all'intero alveo fluviale al fine di cautelarsi da fenomeni di divagamento dell'alveo stesso che si sono verificati in passato e potrebbero verificarsi nuovamente in futuro.

La presente relazione descrive dapprima le risultanze dello studio delle condizioni di deflusso in condizioni di moto permanente, quindi propone un esame degli aspetti evolutivi del corso d'acqua dalla data della costruzione del ponte ad oggi (Cap.3), ed infine riporta le verifiche delle opere di protezione a valle della soglia stessa.(Par 6.1.).

| | | |
|---|---|-----------|
|  | <i>Valutazione di compatibilità idraulica ai sensi della direttiva 2/99 della Autorità di Bacino del fiume Po del ponte ad archi sulla Linea di Cintura sul fiume Reno alla Pk 8+383 della Linea Ferroviaria Bologna-Verona</i> | Redatto: |
| Oggetto: | <i>Relazione idraulica</i> | AP |

2. DOCUMENTAZIONE DI RIFERIMENTO


2.1 Normativa

La normativa di riferimento per gli aspetti idraulici connessi alla realizzazione dei ponti è costituita da:

- Norme tecniche per le costruzioni 2018 – Par. 5.1.2.3 Compatibilità idraulica ponti ferroviari;
- Linee guida RFI – Procedure e interventi di protezione della sede dai fenomeni di dissesto idrogeologico (RFI DTC INC LG IFS 002 C).
- Piano di stralcio per l'assetto idrogeologico. Autorità di Bacino Reno.
- Procedure e interventi di protezione della sede dai fenomeni di dissesto idrogeologico (RFI DTC INC LG IFS 002 C).

2.2 Bibliografia

- “Il controllo del profilo altimetrico dei corsi d'acqua – Capitolo 6” – Dispense Corso di Idraulica Fluviale, parte II introduzione al trasporto solido – Università degli studi di Genova, dipartimento di Ingegneria Ambientale.
- “*RIPRAP Design Criteria, recommended specification, and quality control*”, National Cooperative Highway Research Program – Report 568, Transportation research board of the national academies.

| | | |
|---|---|----------|
|  | <i>Valutazione di compatibilità idraulica ai sensi della direttiva 2/99 della Autorità di Bacino del fiume Po del ponte ad archi sulla Linea di Cintura sul fiume Reno alla Pk 8+383 della Linea Ferroviaria Bologna-Verona</i> | Redatto: |
| Oggetto: | <i>Relazione idraulica</i> | AP |

3. INQUADRAMENTO E DESCRIZIONE DELLE OPERE

3.1 Lineamenti idrologici del fiume Reno


Il bacino del Reno si estende per un'area totale di 5040 km², dall'Appennino emiliano-romagnolo alla pianura fino alla costa adriatica, di questi, 2540 km² formano il bacino montano, ossia il territorio in cui le acque di pioggia scorrono sui versanti e si raccolgono in rii e fossi, lungo tutta la rete di drenaggio fino a formare i deflussi dei corsi d'acqua più importanti.

Il bacino montano del solo Reno, all'opera della Chiusa di Casalecchio, si estende per 1061 km², in direzione sud sud-ovest, nord nord-est, con una quota massima di 1945 m. s.l.m. e minima di 60.35 m alla soglia della chiusa di Casalecchio.

Il reticolo idrografico montano del Reno, piuttosto ramificato e denso, è composto da 8 corsi d'acqua maggiori (classificati principali), 12 secondari (classificati secondari) e da 600 fra torrentelli e rii (classificati minori) e ancora altre centinaia di piccoli rii e fossi (classificati minuti). I corsi d'acqua principali e secondari, seguendo gli affluenti del Reno da monte verso valle, in sinistra sono: il Maresca e l'Orsigna (in territorio toscano), il Randaragna, il rio Maggiore, il Silla con il sub-affluente di sinistra rio Sasso, il Marano, il Vergatello con il subaffluente di destra Aneva, il Croara, il Venola; in destra sono: il Limentra di Sambuca, il Limentra di Treppio, con il sub-affluente di sinistra Limentrella, il Setta con i subaffluenti Brasimone in sinistra (e il suo sub-affluente di sinistra Vezzano) e Gambellato e Sambro in destra idraulica.

La porzione più alta ed estrema del bacino montano del Reno chiuso a Casalecchio si trova in territorio toscano e riguarda: le sorgenti del Reno e l'affluente Maresca, la quasi totalità del sottobacino del Limentra di Sambuca, la metà superiore del sottobacino del Limentra di Treppio e le estremità montane dei sottobacini del Setta e del suo affluente Gambellato.

Nel tratto d'alveo a monte di Casalecchio, 83 km circa, le opere idrauliche sono "non classificate", anche se assimilabili a quelle di 4° e 5° categoria; nel tratto compreso fra la Chiusa di Casalecchio ed il ponte della via Emilia, lungo circa 5.5 km, sono presenti opere classificate di 3° categoria, cui seguono, dal ponte ferroviario della linea Milano-Bologna fino allo sbocco in mare, le arginature continue classificate opere idrauliche di 2^a categoria, con uno sviluppo complessivo di circa 124 km.

| | | |
|---|---|-----------|
|  | <i>Valutazione di compatibilità idraulica ai sensi della direttiva 2/99 della Autorità di Bacino del fiume Po del ponte ad archi sulla Linea di Cintura sul fiume Reno alla Pk 8+383 della Linea Ferroviaria Bologna-Verona</i> | Redatto: |
| Oggetto: | <i>Relazione idraulica</i> | AP |

Il tratto del Reno a valle della Chiusa di Casalecchio si suddivide in un'asta con opere idrauliche classificate di 3^a categoria (Casalecchio - ponte della Via Emilia) lungo 5.5 km ed in un'asta con opere idrauliche classificate di 2^a categoria che si sviluppa per circa 124 km dal ponte FF.SS. della linea Milano-Bologna allo sfocio in mare.


L'asta con opere idrauliche classificate di 3^a categoria si sviluppa per un dislivello di 15 m circa e rappresenta il tratto pedecollinare del corso del Reno. Come tale riveste particolare importanza idraulica dovendo assolvere alla delicata funzione di raccordo fra il regime torrentizio del bacino montano e il regime fluviale del corso arginato di valle.

A definire l'importanza del tratto considerato contribuisce anche il fatto che esso si sviluppa all'interno della zona urbana di Bologna e Casalecchio di Reno.

L'asta con opere idrauliche classificate di 2^a categoria si snoda attraverso i territori di pianura delle province di Bologna, Ferrara e Ravenna. Qui vi si immettono, in sinistra, il torrente Samoggia, ed in destra il canale Navile, i torrenti Savena Abbandonato, Idice, Sillaro, Santerno, Senio.

Le caratteristiche morfologiche dell'asta in esame sono estremamente variabili risentendo delle diverse vicende idrauliche che, nel tempo, hanno determinato l'attuale assetto del fiume Reno. Alle origini, il bacino naturale del Reno si chiudeva alla confluenza con il torrente Samoggia divenendo a valle affluente di destra del fiume Po. A seguito di grandi lavori di riassetto idraulico tesi al recupero ed alla bonifica dei territori vallivi della bassa pianura bolognese, ferrarese e ravennate, il Reno venne inalveato, secondo la proposta di Padre Lecchi formulata nel 1767 e definita "di valle in valle", attraverso il Cavo Benedettino ed il tratto terminale del Po di Primaro giungendo, con successive opere di sistemazione e drizzagni, fino ad assumere l'attuale configurazione che si può così schematizzare:

- primo tratto (circa 19 km da 30 a 14 m di quota) sino a Ponte Bagno, con andamento tortuoso ed ampie estensioni golenali, aventi una funzione modulatrice delle portate di piena, alternate a localizzate strettoie arginali;
- secondo tratto (circa 18 km con quota finale di 13 m circa) sino allo scolmatore di Reno in Po denominato Cavo Napoleonico, con andamento abbastanza regolare e geometria del cavo fluviale significativamente ristretta;
- terzo tratto (circa 47 km) sino alla Bastia, con alveo canalizzato avente argini ravvicinati e molto alti rispetto al piano di campagna; all'interno di tale tratto, è presente uno sfioratore libero in corrispondenza di Gallo di Poggio Renatico - ove si verificarono nel 1949, 1950 e 1951 le rotte dell'argine sinistro - che garantisce la

| | | |
|---|---|-----------|
|  | Valutazione di compatibilità idraulica ai sensi della direttiva 2/99 della Autorità di Bacino del fiume Po del ponte ad archi sulla Linea di Cintura sul fiume Reno alla Pk 8+383 della Linea Ferroviaria Bologna-Verona | Redatto: |
| Oggetto: | Relazione idraulica | AP |

decapitazione naturale delle massime piene con recapito delle acque di esubero nel latitante canale di bonifica “Cembalina”;

- quarto tratto (circa 40 km) sino al mare, con alveo arginato relativamente ampio.

3.2 Il ponte ferroviario

Il ponte ferroviario ad archi obliquo in oggetto è costituito da 18 arcate di luce netta tra 22.2 m e 22.6 m, per uno sviluppo complessivo di 480 m circa.. Nella figura 3.1 seguente uno stralcio delle tavole di progetto originale . All'atto della sua costruzione che risale al 1943 circa , come si può ricavare delle tavole le fondazioni furono impostate circa 1 metro al di sotto della quota di fondo alveo e sono costituite di pozzi con muratura a sacco di profondità pari a 15 metri circa.

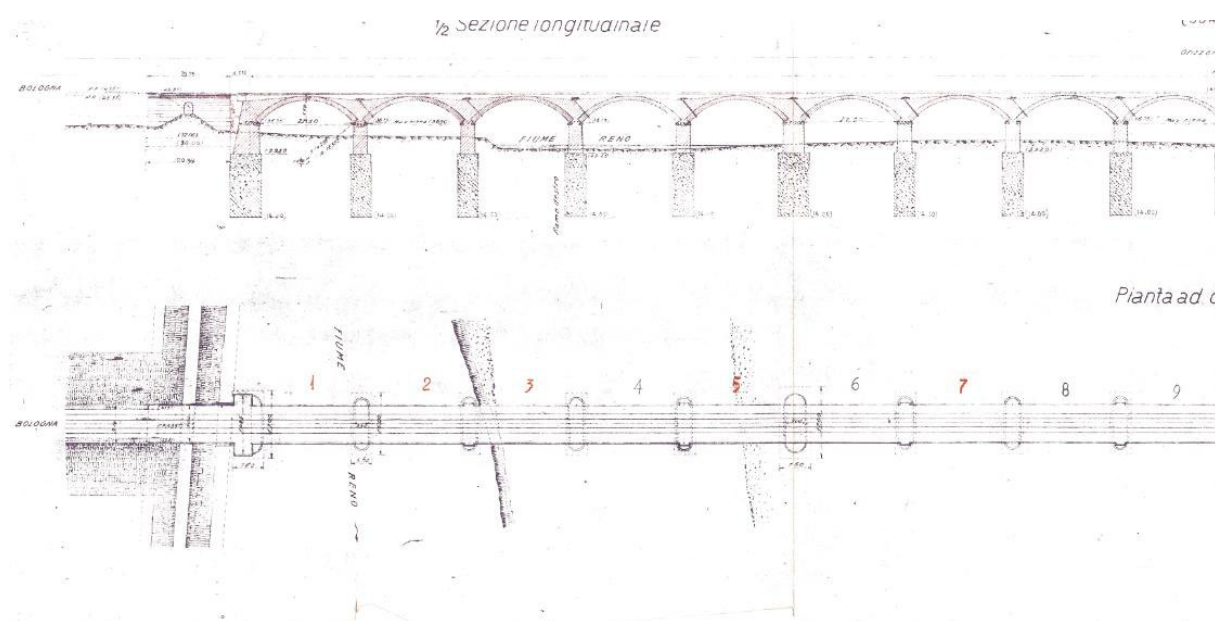


Figura 3.1: Prospetto Ponte ad archi di Cintura (Archivio Storico RFI)

Dal rilievo effettuato la quota di imposta degli archi risulta pari a 34,8 m s.l.m. sulle estremità e 35,3 m s.l.m. al centro del ponte. La chiave delle arcate invece risulta alla quota di 40,3 m.s.l.m. sulle estremità e 40,7 m.s.l.m. al centro del ponte.



| | | |
|---|---|-----------|
|  | Valutazione di compatibilità idraulica ai sensi della direttiva 2/99 della Autorità di Bacino del fiume Po del ponte ad archi sulla Linea di Cintura sul fiume Reno alla Pk 8+383 della Linea Ferroviaria Bologna-Verona | Redatto: |
| Oggetto: | Relazione idraulica | AP |



Figura 3.2: Vista delle arcate a monte



Figura 3.3: Vista delle arcate a valle

| | | |
|---|---|-----------|
|  | Valutazione di compatibilità idraulica ai sensi della direttiva 2/99 della Autorità di Bacino del fiume Po del ponte ad archi sulla Linea di Cintura sul fiume Reno alla Pk 8+383 della Linea Ferroviaria Bologna-Verona | Redatto: |
| Oggetto: | Relazione idraulica | AP |

3.3 Caratteristiche evolutive dell'alveo nell'area di interesse

Lungo l'area golenale risulta presente ad oggi uno sviluppato stato vegetativo. L'alveo, nel tratto di interesse, si può definire in continua e lenta trasformazione.

Si riporta di seguito uno schema concettuale per sintetizzare le evoluzioni morfologiche locali dell'alveo, sulla base delle immagini aeree e satellitari disponibili (fonte immagini: Google Earth ®), in termini di variazione locale dei filoni della corrente di magra.

| Sponda SX Milano - Verona | | | | | | | | | | | | | | | | | Sponda DX Bologna |
|------------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|------|----|------|------|------|----|------|----|----------------------|
| Numerazione Pile RFI (da Dx a Sx) | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |
| Numerazione idraulica (da Sx a Dx) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
| Immagine anno 1931 | S | S | S | S | S | S | S | S | A-AA | A | A | A | A | AA | A-S | S | S |
| Immagine anno 1943 | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | AA-S | AA | A-AA | S | S |
| Immagine anno 2007 | S | S | S | S | S | S | S | S | S | AA | A-AA | A-AA | A-S | S | S | S | S |
| Immagine anno 2018 | S | S | S | S | S | S | S | S | A-S | AA | A-AA | A-AA | A-AA | S | S | S | S |

Tabella 3.1 - Schema concettuale di sintesi delle evoluzioni morfologiche locali dell'alveo con riferimento alle pile del manufatto.

| | |
|--|------|
| Pila su sponda | S |
| Pila in alveo | A |
| Pila in alveo attivo | AA |
| Pila tra alveo e sponda | A-S |
| Pila tra alveo attivo e sponda | AA-S |
| Pila tra alveo ed alveo attivo | A-AA |
| Pila in alveo attivo con flusso di magra | |

Dalla analisi di cui sopra si può rilevare che risulta fortemente vagante nel periodo compreso tra la sua costruzione ad oggi ; infatti nel periodo di costruzione (1943) e precedentemente (1931) l'alveo di magra attivo interessava le pile 3 e 4 in prossimità della sponda destra. A distanza di 60 anni circa le immagini disponibili evidenziano un alveo di magra spostato di circa 100-120 metri verso il centro andando ad interessare le pile 8 e 9.

Le figure 3.3 ÷3.6 illustrano la situazione descritta.


| | | |
|---|---|-----------|
|  | Valutazione di compatibilità idraulica ai sensi della direttiva 2/99 della Autorità di Bacino del fiume Po del ponte ad archi sulla Linea di Cintura sul fiume Reno alla Pk 8+383 della Linea Ferroviaria Bologna-Verona | Redatto: |
| Oggetto: | Relazione idraulica | AP |



Figura 3.3: Vista aerea anno 1931


| | | |
|---|---|-----------|
|  | Valutazione di compatibilità idraulica ai sensi della direttiva 2/99 della Autorità di Bacino del fiume Po del ponte ad archi sulla Linea di Cintura sul fiume Reno alla Pk 8+383 della Linea Ferroviaria Bologna-Verona | Redatto: |
| Oggetto: | Relazione idraulica | AP |



Figura 3.4: Vista aerea anno 1943



| | | |
|---|---|-----------|
|  | Valutazione di compatibilità idraulica ai sensi della direttiva 2/99 della Autorità di Bacino del fiume Po del ponte ad archi sulla Linea di Cintura sul fiume Reno alla Pk 8+383 della Linea Ferroviaria Bologna-Verona | Redatto: |
| Oggetto: | Relazione idraulica | AP |



Figura 3.5: Vista aerea anno 2007

| | | |
|---|---|-----------|
|  | Valutazione di compatibilità idraulica ai sensi della direttiva 2/99 della Autorità di Bacino del fiume Po del ponte ad archi sulla Linea di Cintura sul fiume Reno alla Pk 8+383 della Linea Ferroviaria Bologna-Verona | Redatto: |
| Oggetto: | Relazione idraulica | AP |

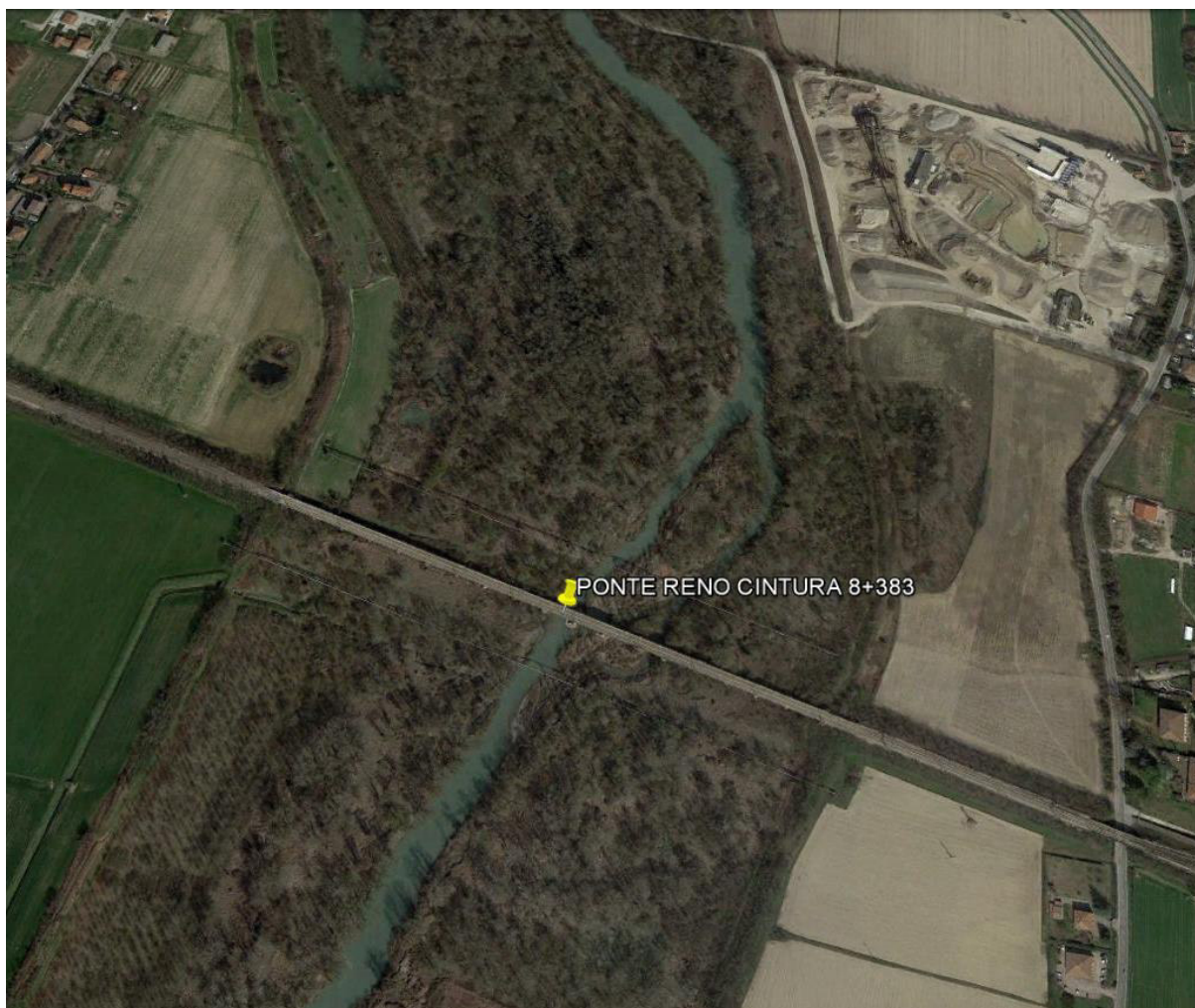



Figura 3.6: Vista aerea anno 2018

Per quanto attiene invece gli aspetti evolutivi del profilo longitudinale del corso d'acqua alcune informazioni importanti emergono confronto dei rilievi dell'alveo all'atto della costruzione del ponte , con i rilievi effettuati nel corso del 2019 per la progettazione degli interventi antierosione. Nella figura 3.7 seguente è rappresentata per la porzione di alveo tra le pile 9 e 12 con il colore blu il profilo della sezione rilevata nel 1943 e con il colore verde la situazione attuale. La differenza di livello è di circa 5 metri a testimonianza della profonda erosione operata dal corso d'acqua nel corso del periodo in esame.

| | | |
|---|---|-----------|
|  | Valutazione di compatibilità idraulica ai sensi della direttiva 2/99 della Autorità di Bacino del fiume Po del ponte ad archi sulla Linea di Cintura sul fiume Reno alla Pk 8+383 della Linea Ferroviaria Bologna-Verona | Redatto: |
| Oggetto: | Relazione idraulica | AP |

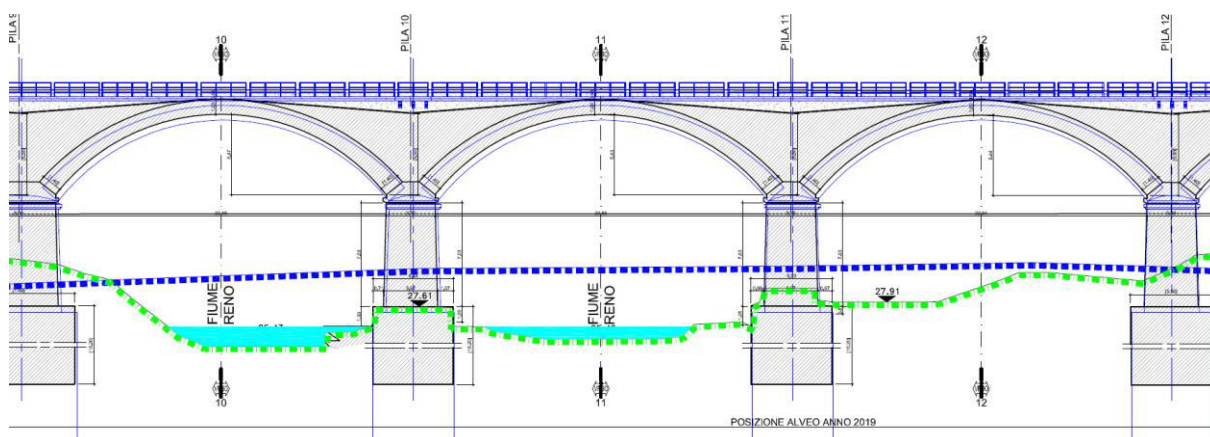


Figura 3.7: Confronto sezione rilievo 1943 -2019-Pile 9-12

Come si evince dalla sovrapposizione dei rilievi, l'alveo nella sezione di interesse ha subito un abbassamento di circa 5 metri.

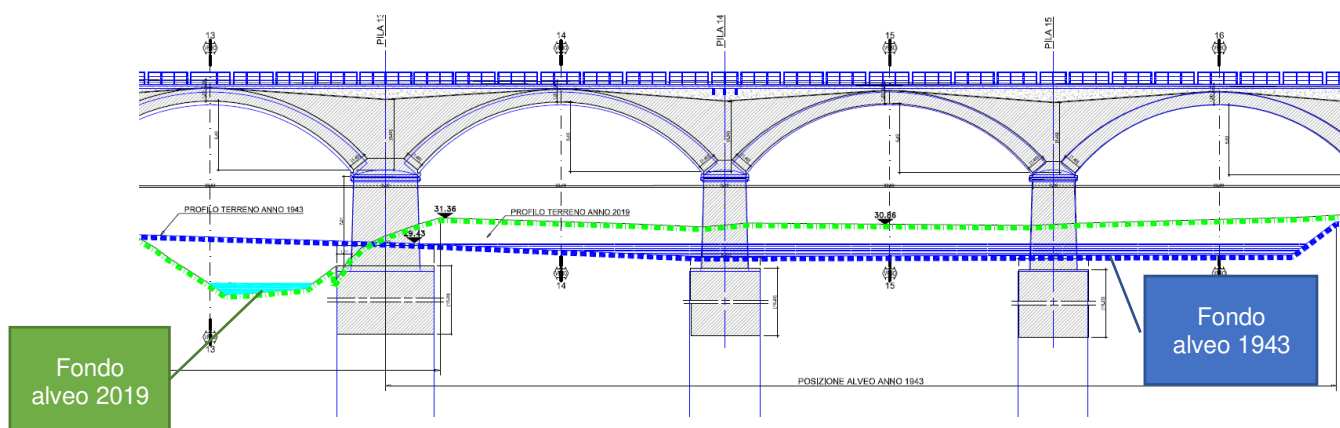



Figura 3.8: Confronto sezione rilievo 1943 -2019 - Pile 13-16

Dall'esame della porzione tra le pile 13 e 16 si rileva invece che l'alveo si è spostato verso il centro della sezione e la parte interessata dal deflusso costituisce oggi la golena. Inoltre se si confronta la quota fondo nei due momenti si trova riscontro della fortissima erosione operata dal corso d'acqua.

A protezione da fenomeni di erosione localizzata sull'opera non sono presenti protezioni. Per questo si prevede la costruzione di una soglia in C.A. fondata su pali, di lunghezza 471 m e larghezza di 20 m. La soglia è provvista di una protezione a monte formata da una rampa in massi lapidei con peso compreso tra 1000 e 3000 kg di lunghezza di 10 m circa. A valle della soglia sarà predisposto un scivolo sempre in massi ciclopici con lunghezza in alveo di circa 15 m e zona piana di dissipazione di circa 10 m.

| | | |
|---|---|-----------|
|  | Valutazione di compatibilità idraulica ai sensi della direttiva 2/99 della Autorità di Bacino del fiume Po del ponte ad archi sulla Linea di Cintura sul fiume Reno alla Pk 8+383 della Linea Ferroviaria Bologna-Verona | Redatto: |
| Oggetto: | Relazione idraulica | AP |

3.4 La nuova soglia a protezione del ponte

Sulla base delle considerazioni di cui sopra si è stabilito di realizzare una soglia in cls a protezione delle fondazioni da estendersi lungo tutto il ponte per uno sviluppo complessivo di m 441.0. La decisione di proteggere l'intera sezione e non la sola zona interessata dall'alveo di magra scaturisce dal fatto che l'alveo di magra è fortemente vagante e si è spostato di circa 100 metri dalla sua posizione all'atto della costruzione.

In merito alla quota da assegnare alla soglia è stato svolto un approfondito studio di morfologia fluviale al fine di individuare quale fosse la quota ottimale della soglia che contemperasse le due esigenze:

- garantire la stabilità dell'opera d'arte e ripristinare la quota dell'alveo in corrispondenza di essa coerentemente con le quote presenti all'atto della costruzione;
- minimizzare gli effetti indotti dalla modifica della quota di fondo alveo sul trasporto solido da un lato e sul profilo di piena dall'altro.


La definizione della quota di estradosso della soglia, misurata in asse al ponte, nella zona compresa tra le pile 9 e 13 è stata analizzata per diverse configurazioni in modo da valutarne l'effetto sul profilo altimetrico del fondo alveo. La soglia nella direzione longitudinale è lunga 20 m e presenta una pendenza del 2% risultando a monte in una quota di estradosso di 0.15 m superiore e 0.15 m inferiore della quota di estradosso in asse al ponte rispettivamente nelle sezioni a monte e a valle del ponte.

Le configurazioni esaminate sono elencate in **Error! Reference source not found..**

| Configurazione | Quota estradosso soglia (asse ponte) | Scopertura dado di fondazione (pila 10) | Altezza dal fondo alveo |
|----------------|--------------------------------------|---|-------------------------|
| | m slm | m | m |
| a | 28.15 | -0.52 | 4.21 |
| b | 27.63 | 0 | 3.69 |
| c | 26.27 | 1.36 | 2.33 |

Alternative di progetto della soglia in corrispondenza del ponte.

Per ciascuna delle quote analizzate è stata effettuata la modellazione delle modifiche indotte sulle quote del fondo alveo a monte della soglia, sul trasporto solido e sui profili idrici della portata di piena al fine di individuare la soluzione ottimale.

| | | |
|---|---|-----------|
|  | Valutazione di compatibilità idraulica ai sensi della direttiva 2/99 della Autorità di Bacino del fiume Po del ponte ad archi sulla Linea di Cintura sul fiume Reno alla Pk 8+383 della Linea Ferroviaria Bologna-Verona | Redatto: |
| Oggetto: | Relazione idraulica | AP |

Nello specifico questa è stata individuata nella “Configurazione C” che presenta una quota in asse al ponte pari a $Q = 26.27$ m.s.m.

Le quote riportate in precedenza ($Q = 26.27$ msm) si riferiscono alla zona centrale tra le pile 9 e 13 nelle quali, allo stato attuale è contenuto l'alveo di magra e dove si verrà a configurare una sorta di gaveta.

Tra la spalla A e la pila 9 e tra la pila 13 e la spalla B la quota della soglia verrà rialzata in quanto ricade al di sotto della zona golenale che presenta quote del terreno naturale superiori portandola alla quota $Q = 28.65$ m.s.m.

Pertanto, esisteranno zone nelle quali per costruire la soglia occorrerà effettuare un rinterro anche piuttosto cospicuo, mentre altre, che interessano la zona golenale, per le quali la soglia risulterà a quote inferiori a quelle del terreno attuale.

In queste zone la soglia verrà interrata a seguito della costruzione e risulterà disponibile qualora l'alveo di magra subisca nuovamente spostamenti lungo la sezione.

In merito alle specifiche analisi condotte si rimanda all'elaborato “Studio idraulico ed analisi del trasporto solido (182417-I01-PDTG15-09-E001).

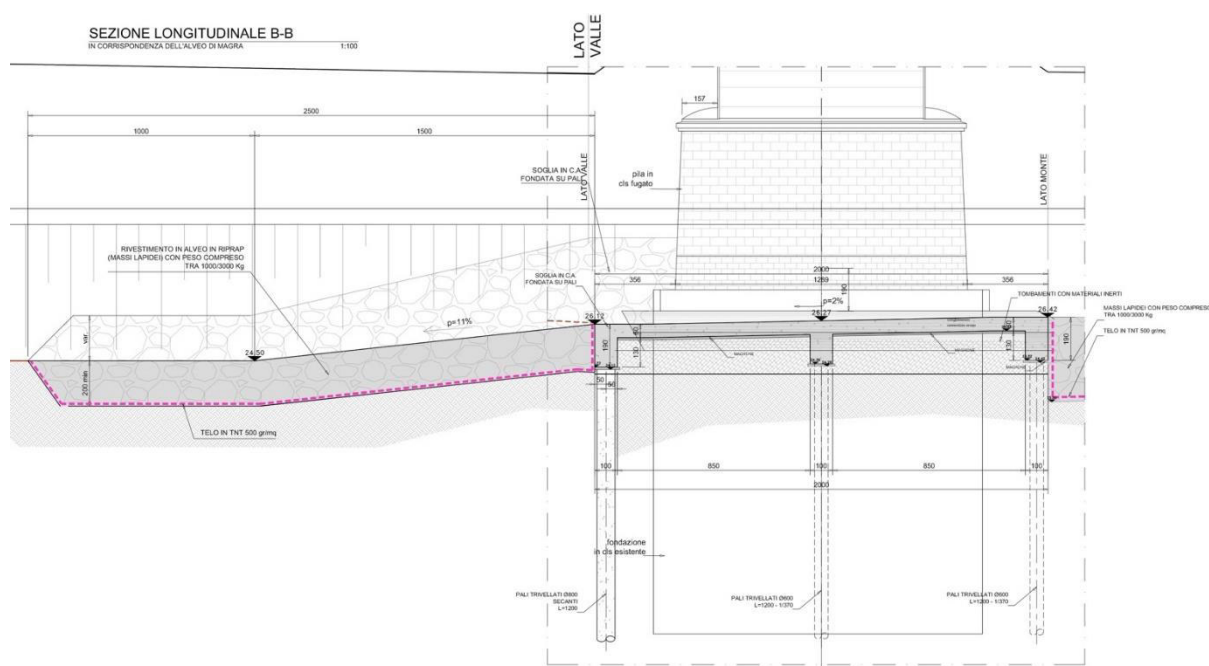



Figura 3.9: Sezione longitudinale della soglia

Il dislivello complessivo che si viene a creare verso valle per effetto dell'innalzamento della quota di scorrimento, rispetto alla situazione attuale, è pari a 1.6 metri circa, dislivello che verrà raccordato con uno scivolo in pietrame di sviluppo pari a 15.0, con pendenza pari all'11%; a valle di esso è prevista una ulteriore area protetta di sviluppo pari a 10.0 metri. La

| | | |
|---|---|-----------|
|  | Valutazione di compatibilità idraulica ai sensi della direttiva 2/99 della Autorità di Bacino del fiume Po del ponte ad archi sulla Linea di Cintura sul fiume Reno alla Pk 8+383 della Linea Ferroviaria Bologna-Verona | Redatto: |
| Oggetto: | Relazione idraulica | AP |

protezione e lo scivolo sono limitati alla parte centrale di alveo per uno sviluppo trasversale di circa 80 metri.

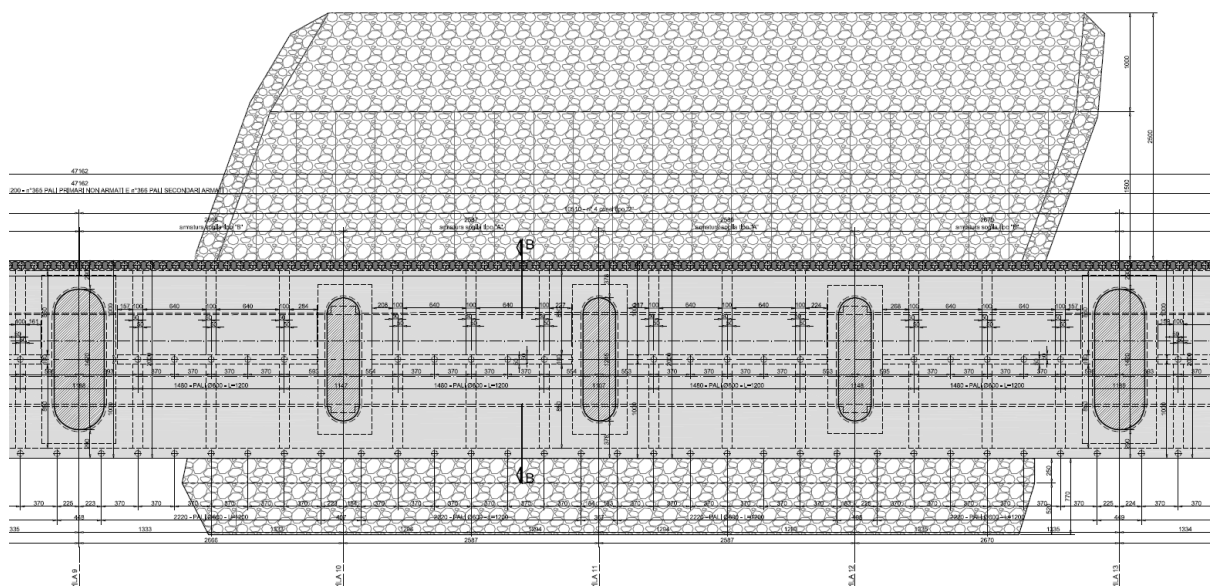



Figura 3.9: Scivolo di protezione in pietrame –Stralcio Planimetrico

Sotto il profilo strutturale la soglia è costituita da una soletta nervata di spessore minimo pari a cm 60. irrigidita da un graticcio di travi di spessore totale pari a m 1.9.

La fondazione della soglia è prevista su pali trivellati di diametro pari a 600 mm per gli allineamenti di monte e centrale e pari a 800 mm per quello di valle; l'interasse dei pali è pari a 3.7 m per gli allineamenti di monte e centrale, mentre l'allineamento di valle è costituito da pali secanti (1 armato e 1 non armato) al fine di costituire un taglione protettivo nei confronti dell'erosione regressiva che potesse istaurarsi in futuro ed al fine di eliminare possibili fenomeni di sifonamento al di sotto della soglia stessa (vedi apposite verifiche nell'ambito della relazione di verifica strutturale) .

La lunghezza di tutti i pali è pari a m 12 così da intestarsi per circa 2 metri all'interno dello strato di ghiaie.

Nella figura 3.10 seguente è riportato uno stralcio di profilo della soglia (allineamento di monte) nella zona interessata dall'alveo di magra attuale . Come si vede esistono zone nelle quali per costruire la soglia occorrerà effettuare un rinterro anche piuttosto cospicuo, mentre altre , che interessano la zona golenale attuale per le quali la soglia risulterà a quote inferiori a quelle del terreno attuale (vedi fig 3.11) .

| | | |
|---|---|-----------|
|  | Valutazione di compatibilità idraulica ai sensi della direttiva 2/99 della Autorità di Bacino del fiume Po del ponte ad archi sulla Linea di Cintura sul fiume Reno alla Pk 8+383 della Linea Ferroviaria Bologna-Verona | Redatto: |
| Oggetto: | Relazione idraulica | AP |

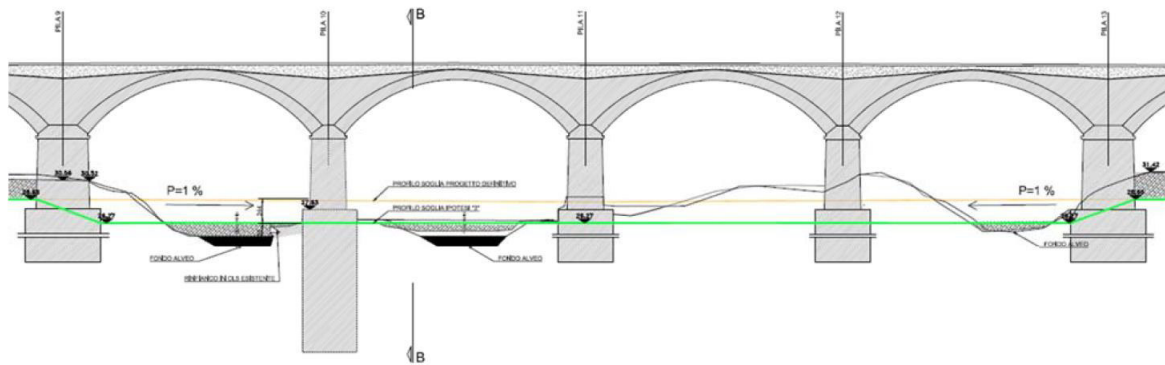


Figura 3.10: Profilo della soglia sull'allineamento di monte

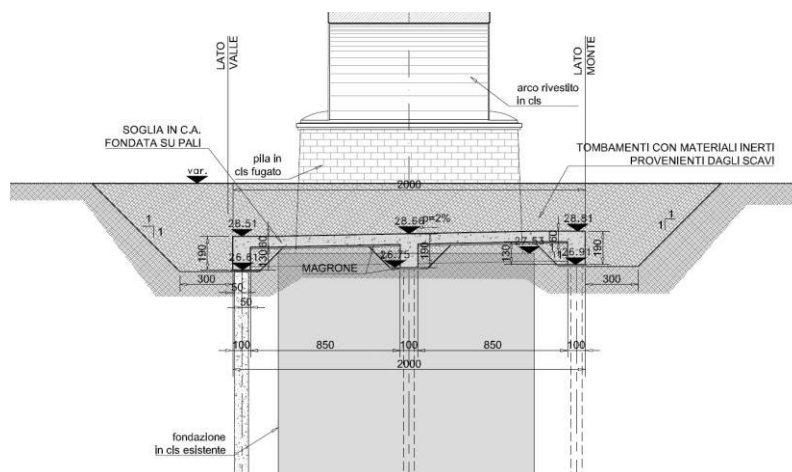



Figura 3.11: Sezione della soglia in corrispondenza delle aree golenali

In queste zone la soglia verrà rinterrata a seguito della costruzione e risulterà disponibile qualora l'alveo di magra subisca nuovamente spostamenti lungo la sezione.

| | | |
|---|---|-----------|
|  | Valutazione di compatibilità idraulica ai sensi della direttiva 2/99 della Autorità di Bacino del fiume Po del ponte ad archi sulla Linea di Cintura sul fiume Reno alla Pk 8+383 della Linea Ferroviaria Bologna-Verona | Redatto: |
| Oggetto: | Relazione idraulica | AP |

4. DEFINIZIONE DELLA PORTATA

4.1 Portate Autorità di Bacino del fiume Po (ex Reno)

L'autorità di bacino del fiume Po ha fornito esclusivamente le portate di piena, per il tratto in oggetto, con riferimento ad eventi con tempi di ritorno TR 25 e 100 anni, come riportato a seguire (Relazione Autorità di Bacino del Fiume Reno – Rischio idraulico e assetto della rete idrografica – 6 dicembre 2002).

| CODICE | SEZIONI | | | PORTATE E LIVELLI | | | | MORFOLOGIA DELLA SEZIONE | | |
|--------|------------------------|----------------|-------------|----------------------|------------------|-----------------------|-------------------|---------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|
| | Distanza Progr. [m] | Localizzazione | Descrizione | Lmax25 [m s.l.m.] | Qmax25 [m³/s] | Lmax100 [m s.l.m.] | Qmax100 [m³/s] | Quota sommità argine sx [m s.l.m.] | Quota del fondo [m s.l.m.] | Quota sommità argine dx [m s.l.m.] |
| Vla m | 92801 | Ponte FS | m. ponte | 33.2 | 1468 | 34.2 | 1969 | 40.5 | 24.9 | 41.0 |
| Vla v | 92811 | Ponte FS | v. ponte | 33.2 | 1467 | 34.2 | 1969 | 40.5 | 24.9 | 41.0 |

Tabella 4-1 :portate fiume Reno

4.2 Calcolo portata


Per determinare il valore di portata per tempi di ritorno diversi da quelli forniti dall'Adb Po, si è proceduto con due metodologie:

- Metodo VAPI;
- Interpolazione logaritmica.

Metodo VAPI

La prima metodologia utilizzata, per la stima delle portate di assegnato tempo di ritorno, fa riferimento ai risultati ottenuti e riportati nel rapporto di Valutazione delle Piene del GNDCl per i corsi d'acqua dell'Emilia-Romagna. Nel progetto VAPI il modello probabilistico adottato è quello a doppia componente (TCEV), che si basa sull'assunzione che gli eventi estremi di un campione (piogge intense, piene, ecc.) appartengano a due insiemi diversi distribuiti in modo simile (es: eventi massimi ordinari, più frequenti ma meno intensi, ed eventi massimi straordinari, meno frequenti ma spesso catastrofici).

Da tale studio risulta che per la determinazione della portata al colmo, per un dato tempo di ritorno, occorre moltiplicare il valore di KT per quello della portata indice, coincidente con la media dei colmi $m(Q)$. Pertanto conoscendo la portata massima per un tempo di ritorno di 25 e 100 anni tramite la semplice proporzione, si possono ottenere le portate per qualunque tempo di ritorno utilizzando i fattori di crescita sotto riportati.

| | | |
|---|---|-----------|
|  | Valutazione di compatibilità idraulica ai sensi della direttiva 2/99 della Autorità di Bacino del fiume Po del ponte ad archi sulla Linea di Cintura sul fiume Reno alla Pk 8+383 della Linea Ferroviaria Bologna-Verona | Redatto: |
| Oggetto: | Relazione idraulica | AP |

| Tr (anni) | 2 | 5 | 10 | 20 | 25 | 40 | 50 | 100 | 200 | 500 | 1000 |
|----------------|------|-----|------|------|------|-----|------|------|------|------|------|
| K _t | 1.01 | 1.3 | 1.51 | 1.71 | 1.77 | 1.9 | 1.97 | 2.17 | 2.37 | 2.63 | 2.83 |

Le relative portate calcolate con l'applicazione della metodologia VAPI sono riportate nella tabella seguente:

| Tr | 2 | 5 | 10 | 20 | 25 | 40 | 50 | 100 | 200 | 500 | 1000 |
|--------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Q VAPI | 916 | 1180 | 1370 | 1552 | 1606 | 1724 | 1788 | 1969 | 2150 | 2386 | 2568 |

Interpolazione logaritmica

Nel secondo metodo si è proceduto mediante regressione logaritmica, nel piano “tempi di ritorno “TR” come ascisse” ed i relativi valori di portata “Q” come ordinate; interpolando le coppie di dati mediante una regressione logaritmica, si ottiene il seguente grafico:

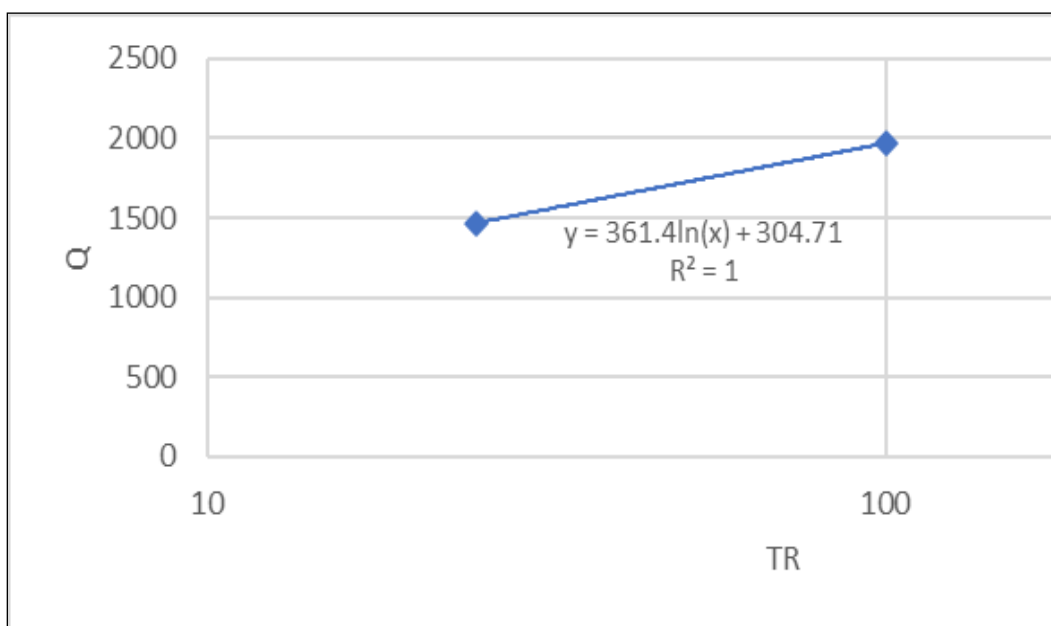



Figura 4.1: Regressione logaritmica per i valori di portata del fiume Reno su Ponte di Cintura

Attraverso l'equazione seguente si possono ricavare valori di portata per tempi di ritorno diversi da quelli forniti dall'Autorità di Bacino.

$$Q = 361.4 \ln(T_R) + 304.71$$


| | | |
|---|---|-----------|
|  | <i>Valutazione di compatibilità idraulica ai sensi della direttiva 2/99 della Autorità di Bacino del fiume Po del ponte ad archi sulla Linea di Cintura sul fiume Reno alla Pk 8+383 della Linea Ferroviaria Bologna-Verona</i> | Redatto: |
| Oggetto: | <i>Relazione idraulica</i> | AP |

Confronto

Si riportano di seguito i valori ottenuti con le due metodologie. Come mostrato in tabella i valori ottenuti mediante regressione logaritmica per tempi di ritorno maggiori di 200 anni sono più elevati di quelli ottenuti con il metodo VAPI

| Tr | 20 | 25 | 40 | 50 | 100 | 200 | 500 | 1000 |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Q VAPI | 1552 | 1606 | 1724 | 1788 | 1969 | 2150 | 2386 | 2568 |
| Q reg | 1387 | 1468 | 1638 | 1719 | 1969 | 2232 | 2551 | 2801 |

Si è deciso pertanto, a favore di sicurezza di utilizzare i valori ottenuti con la metodologia della regressione logaritmica

| | | |
|---|--|----------|
|  | Valutazione di compatibilità idraulica ai sensi della direttiva 2/99 della Autorità di Bacino del fiume Po del ponte ad archi sulla Linea di Cintura sul fiume Reno alla Pk 8+383 della Linea Ferroviaria Bologna-Verona | Redatto: |
| Oggetto: | Relazione idraulica | AP |

5. MODELLAZIONE IDRAULICHE

La verifica dell'opera è stata effettuata in condizioni di moto permanente mediante l'ausilio del software di calcolo HEC-RAS, di cui si riporta in Allegato 1 una breve descrizione. Tali verifiche sono state effettuate sia allo stato Ante Operam che allo stato Post Operam.

5.1 Portate di modellazione

La portata di piena di riferimento da assumere per le simulazioni idrauliche è quella con un tempo di ritorno $T_R=200$ anni. Tale scelta è stata effettuata in conformità a quanto richiesto al §2.5 della "Direttiva 2/99" dell'AdB Po.

Per la taratura del modello idraulico si è proceduto alla simulazione con le portate fornite dall'Autorità di Bacino (par. 4.1) per tempo di ritorno pari a 25 e 100 anni. In tal modo, considerando i livelli idrici forniti, è stato possibile definire i coefficienti di scabrezza di Manning e le condizioni al contorno di valle. Di seguito le portate utilizzate

$$Q (T_R= 25 \text{ anni}) = 1470 \text{ mc/s}$$

$$Q (T_R= 100 \text{ anni}) = 1970 \text{ mc/s}$$

$$Q (T_R= 200 \text{ anni}) = 2232 \text{ mc/s}$$


5.2 Dettagli analisi Ante Operam

È stato analizzato un tratto di alveo corrispondente ad una asta di lunghezza 4964 m, caratterizzata da:

- un primo tratto di alveo a monte del ponte ferroviario (2997 m circa)
- un secondo tratto caratterizzato dalla presenza del ponte ferroviario (10 m circa);
- un terzo tratto di alveo a valle del ponte ferroviario (1957 m circa).

Sono state inserite 42 sezioni trasversali, di cui:


- 27 ricavate dal rilievo topografico lidar (2009);
- 2 determinate da rilievo celerimetrico sul ponte appositamente eseguito per lo studio (2019);
- 10 sezioni sono state riprese dal rilievo dell'Autorità di Bacino del 2004 di cui 3 a monte del Ponte di Cintura (inizio modello) e 7 a valle del ponte;
- 3 sezioni sono state riprese dal rilievo dell'Autorità di Bacino del 2002, tutte inserite a valle fino a fine modello.

| | | |
|---|---|-----------|
|  | <i>Valutazione di compatibilità idraulica ai sensi della direttiva 2/99 della Autorità di Bacino del fiume Po del ponte ad archi sulla Linea di Cintura sul fiume Reno alla Pk 8+383 della Linea Ferroviaria Bologna-Verona</i> | Redatto: |
| Oggetto: | <i>Relazione idraulica</i> | AP |

La numerazione delle sezioni è stata effettuata a partire dalla sezione 49 a monte fino alla sezione 08 a valle. Le sezioni del ponte sono rispettivamente la n. 25 (monte) e la n. 24 (valle).

Le sezioni sono state quindi confrontate ed integrate con quelle fornite dall'autorità di Bacino del fiume Po (ex Reno). Il rilievo topografico-batimetrico condotto, è stato "appoggiato" ai caposaldi forniti dalla competente autorità.

Di seguito si riporta lo stralcio planimetrico con l'ubicazione delle sezioni adottate e la tabella con i risultati delle verifiche eseguite:

| | | |
|---|---|-----------|
|  | Valutazione di compatibilità idraulica ai sensi della direttiva 2/99 della Autorità di Bacino del fiume Po del ponte ad archi sulla Linea di Cintura sul fiume Reno alla Pk 8+383 della Linea Ferroviaria Bologna-Verona | Redatto: |
| Oggetto: | Relazione idraulica | AP |

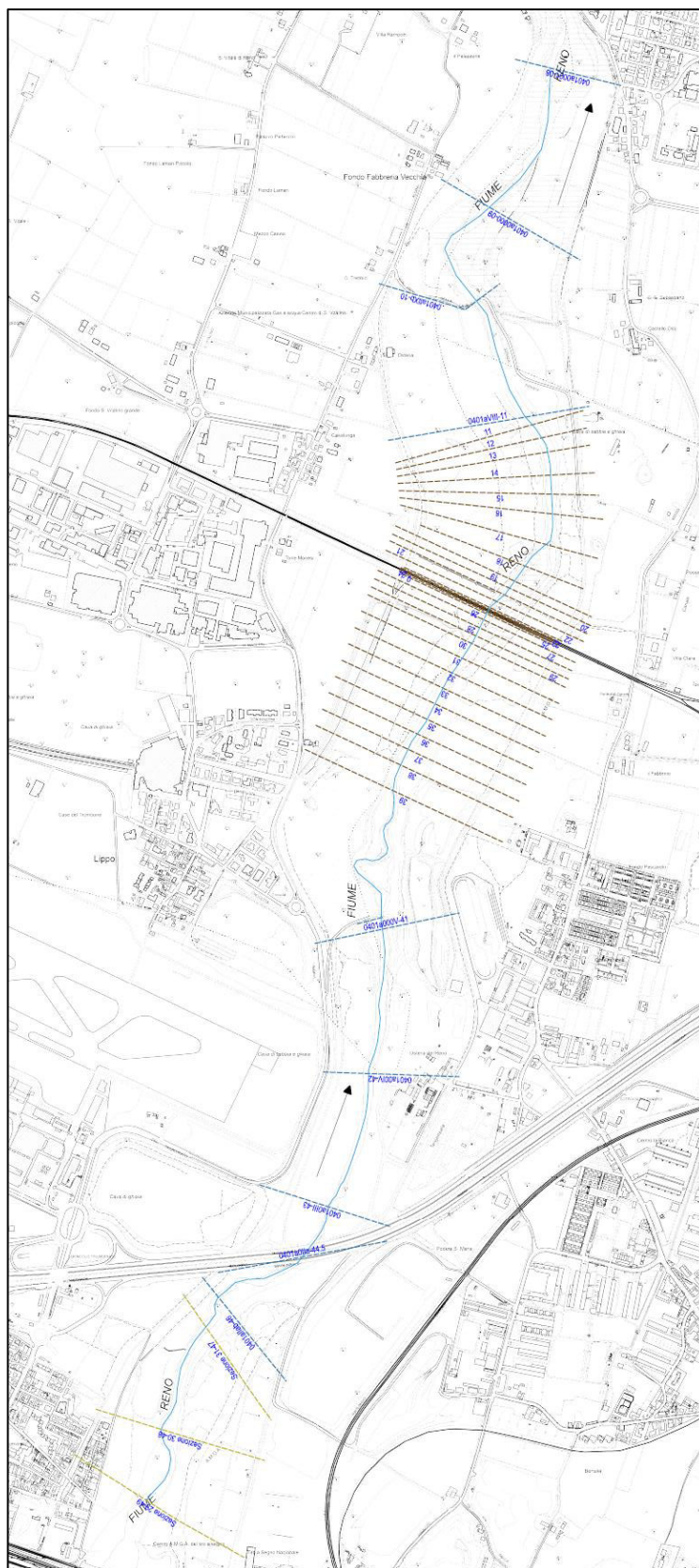


Figura 5.1: planimetria con ubicazione delle sezioni



| | | |
|---|--|----------|
|  | Valutazione di compatibilità idraulica ai sensi della direttiva 2/99 della Autorità di Bacino del fiume Po del ponte ad archi sulla Linea di Cintura sul fiume Reno alla Pk 8+383 della Linea Ferroviaria Bologna-Verona | Redatto: |
| Oggetto: | Relazione idraulica | AP |



Figura 5.2: planimetria con ubicazione delle sezioni nei pressi del Ponte di Cintura

| | | |
|---|---|-----------|
|  | Valutazione di compatibilità idraulica ai sensi della direttiva 2/99 della Autorità di Bacino del fiume Po del ponte ad archi sulla Linea di Cintura sul fiume Reno alla Pk 8+383 della Linea Ferroviaria Bologna-Verona | Redatto: |
| Oggetto: | Relazione idraulica | AP |

Dal rilievo LIDAR è stato possibile ricavare anche un modello digitale (DEM) del tratto di seguito riportato.

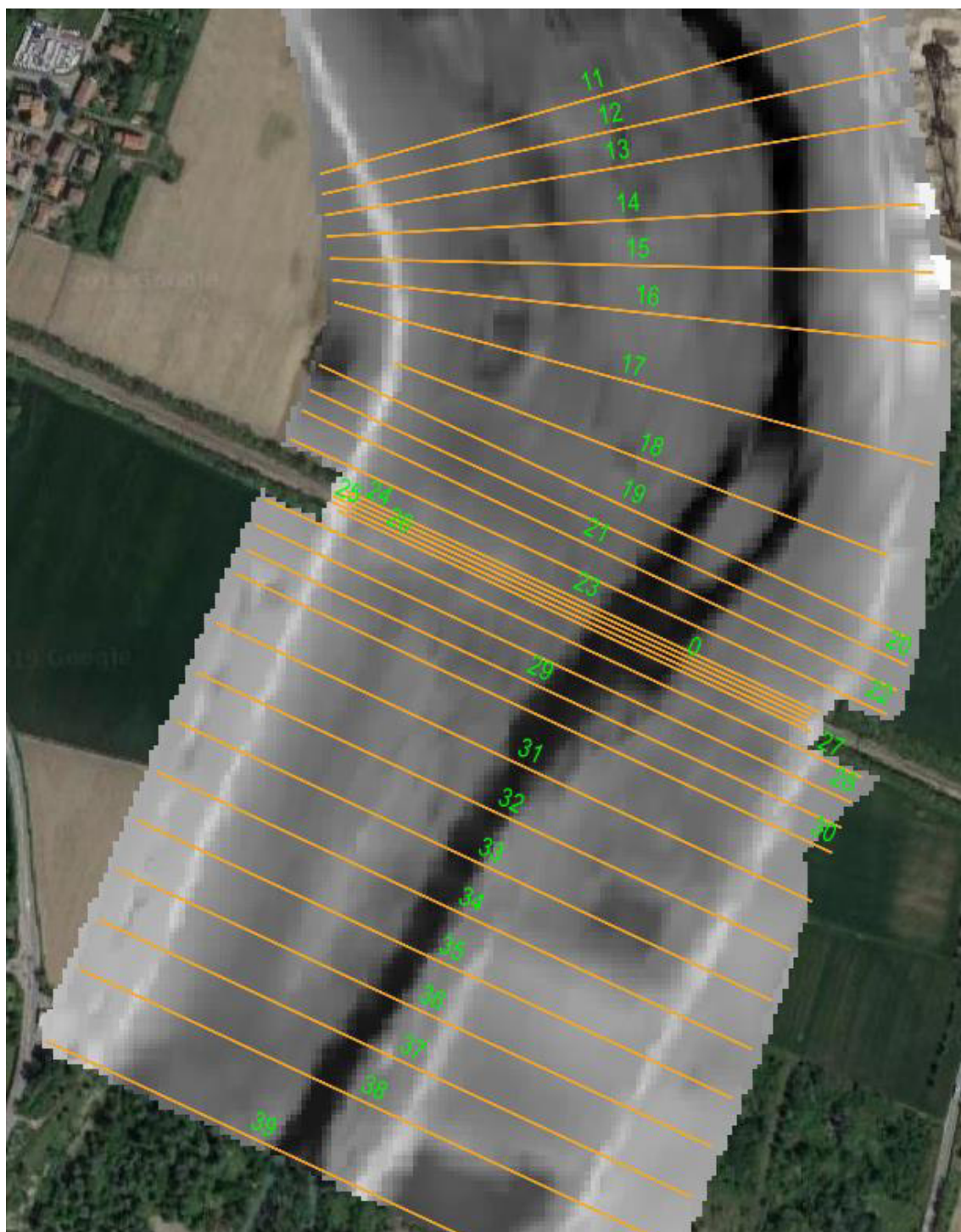



Figura 5.3:: DEM con ubicazione delle sezioni nei pressi del Ponte di Cintura


| | | |
|---|--|----------|
|  | Valutazione di compatibilità idraulica ai sensi della direttiva 2/99 della Autorità di Bacino del fiume Po del ponte ad archi sulla Linea di Cintura sul fiume Reno alla Pk 8+383 della Linea Ferroviaria Bologna-Verona | Redatto: |
| Oggetto: | Relazione idraulica | AP |

Quale coefficiente di scabrezza associato alle singole sezioni fluviali, in centro alveo è stato assunto il valore di Manning pari a $0.044 \text{ s/m}^{-1/3}$, mentre per le golene $0.055 \text{ s/m}^{-1/3}$. A valle del ponte, dalla sezione 22 alla sezione 17 vi è una biforcazione dell'alveo che presenta in centro una sorta di isola con presenza di vegetazione fitta. In questa zona è stato assunto un coefficiente pari a quello delle golene.



Figura 5.4: Sezioni con biforcazione dell'alveo

Per il modello di calcolo è stata inserita la *Normal depth* = 0.001 m/m ovvero l'altezza del pelo libero relativa al moto uniforme come condizione al contorno di valle.

| | | |
|---|--|----------|
|  | Valutazione di compatibilità idraulica ai sensi della direttiva 2/99 della Autorità di Bacino del fiume Po del ponte ad archi sulla Linea di Cintura sul fiume Reno alla Pk 8+383 della Linea Ferroviaria Bologna-Verona | Redatto: |
| Oggetto: | Relazione idraulica | AP |

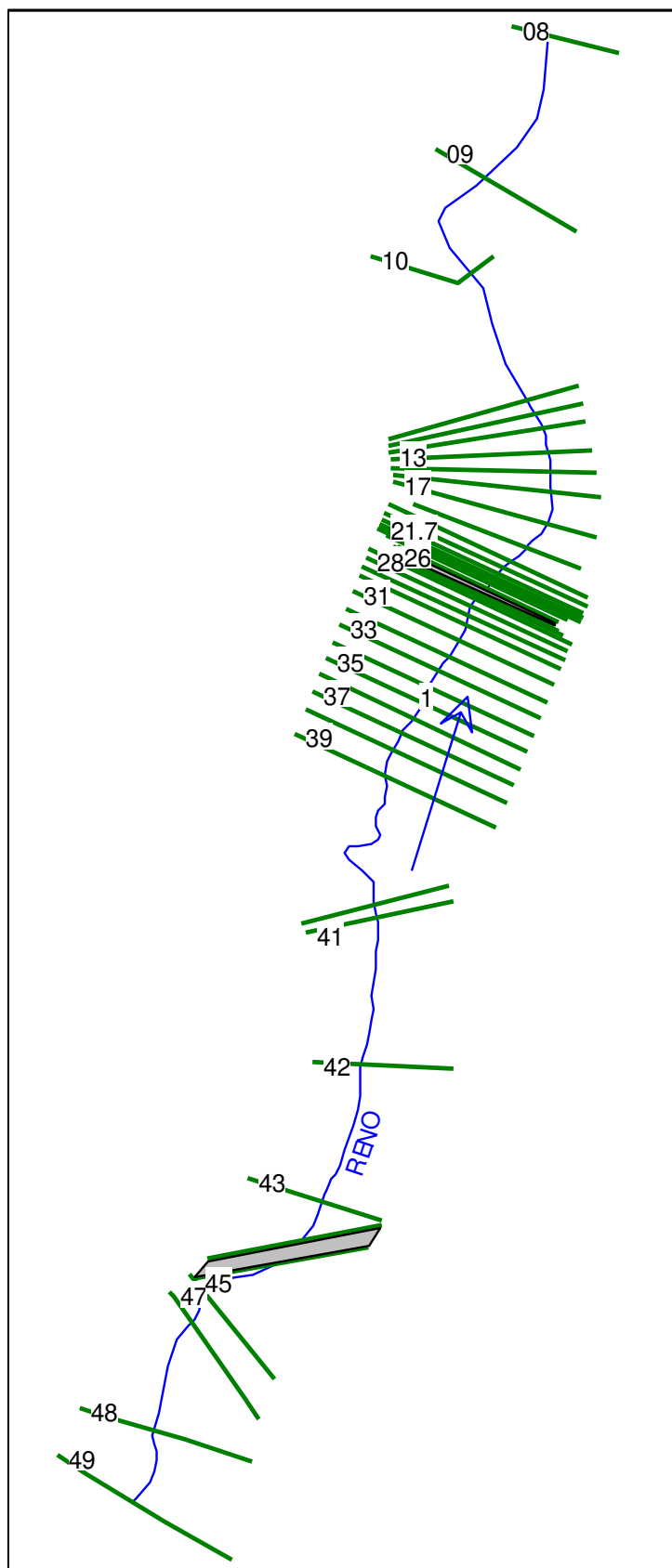



Figura 5.5: asse e sezioni simulate in HecRAS


| | | |
|---|---|-----------|
|  | Valutazione di compatibilità idraulica ai sensi della direttiva 2/99 della Autorità di Bacino del fiume Po del ponte ad archi sulla Linea di Cintura sul fiume Reno alla Pk 8+383 della Linea Ferroviaria Bologna-Verona | Redatto: |
| Oggetto: | Relazione idraulica | AP |

5.3 Risultati analisi Ante Operam

Di seguito i risultati delle analisi nello stato Ante Operam.


| Sezione | Min Ch El (m) | W.S. Elev (m) | Crit W.S. (m) | E.G. Elev (m) | Vel Chnl (m/s) | Flow Area (m ²) | Top Width (m) | Froude # Chl |
|-----------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|--------------------------------|------------------|--------------|
| 49 | 29.27 | 36.82 | 33.78 | 37.01 | 2.05 | 869.34 | 240.73 | 0.28 |
| 48 | 28.39 | 36.64 | 34.41 | 36.81 | 2.19 | 1001.26 | 343.55 | 0.28 |
| 47 | 27.78 | 36.31 | 34.14 | 36.49 | 2.24 | 934.34 | 257.19 | 0.29 |
| 46 | 27.43 | 36.14 | 33.74 | 36.39 | 2.44 | 788.35 | 210.39 | 0.31 |
| 45 | 28.3 | 35.71 | 33.67 | 36.07 | 3.37 | 652.9 | 200.73 | 0.41 |
| 44.5 BR U | 28.3 | 35.71 | 33.59 | 36.05 | 3.26 | 652.99 | 163.55 | 0.3 |
| 44.5 BR D | 28.3 | 35.56 | 33.59 | 35.92 | 3.38 | 627.56 | 160.92 | 0.32 |
| 44 | 28.3 | 35.5 | 33.66 | 35.9 | 3.54 | 618.83 | 197.23 | 0.44 |
| 43 | 27.87 | 35.52 | 32.76 | 35.68 | 1.95 | 904.36 | 212.93 | 0.26 |
| 42 | 25.45 | 34.63 | 33.06 | 35.2 | 3.82 | 523.28 | 157.69 | 0.45 |
| 41 | 26.84 | 34.24 | 31.14 | 34.35 | 2.03 | 1143.76 | 340.59 | 0.27 |
| 40 | 27 | 34.23 | 31 | 34.31 | 1.94 | 1183.03 | 340.59 | 0.23 |
| 39 | 25.5 | 34.03 | 30.24 | 34.08 | 1.28 | 1748.48 | 426.7 | 0.15 |
| 38 | 25.5 | 33.95 | 31.34 | 34.05 | 1.88 | 1314.14 | 417.03 | 0.23 |
| 37 | 25.34 | 33.85 | 32.18 | 34.01 | 2.31 | 1134.65 | 427.74 | 0.28 |
| 36 | 25.5 | 33.72 | 31.98 | 33.94 | 2.61 | 973.32 | 440.41 | 0.33 |
| 35 | 25.94 | 33.28 | 32.67 | 33.81 | 3.91 | 611.91 | 315.14 | 0.53 |
| 34 | 25.5 | 33.27 | 31.89 | 33.63 | 3.19 | 795.33 | 415.27 | 0.41 |
| 33 | 25.13 | 33.37 | 31.02 | 33.5 | 2.04 | 1204.87 | 444.49 | 0.27 |
| 32 | 25.5 | 33.24 | 32.3 | 33.44 | 2.54 | 998.64 | 445.67 | 0.35 |
| 31 | 25.5 | 33.21 | 31.81 | 33.36 | 2.19 | 1125.57 | 450 | 0.29 |
| 30 | 25.5 | 33.2 | 30.48 | 33.31 | 1.81 | 1288.4 | 456.74 | 0.23 |
| 29 | 25.5 | 33.2 | 30.76 | 33.29 | 1.67 | 1381 | 456.47 | 0.22 |
| 28 | 25.5 | 33.2 | 30.47 | 33.28 | 1.57 | 1497.29 | 457.95 | 0.2 |
| 27 | 25.5 | 33.18 | 28.85 | 33.26 | 1.43 | 1429.38 | 465.83 | 0.18 |
| 26 | 25 | 33.17 | 28.84 | 33.26 | 1.46 | 1447.65 | 461.43 | 0.18 |
| 25 | 24.46 | 33.08 | 30.33 | 33.25 | 2.06 | 1052.08 | 456.09 | 0.28 |
| 24.5 BR U | 24.46 | 33.09 | 30.33 | 33.24 | 1.96 | 1019.54 | 387.34 | 0.18 |
| 24.5 BR D | 23.96 | 33.07 | 30.16 | 33.23 | 2.05 | 1016.3 | 384.53 | 0.19 |
| 24 | 23.96 | 33.06 | 30.16 | 33.23 | 2.07 | 1050.7 | 454.9 | 0.27 |
| 23 | 25 | 33.11 | 28.76 | 33.2 | 1.53 | 1368.79 | 463.97 | 0.19 |
| 22 | 25 | 33.11 | 28.82 | 33.19 | 1.46 | 1479.56 | 472.63 | 0.18 |
| 21 | 25 | 33.11 | 28.94 | 33.18 | 1.33 | 1611.41 | 478.71 | 0.17 |
| 20 | 24.64 | 33.11 | 30.4 | 33.17 | 1.34 | 1584.99 | 483.18 | 0.18 |
| 19 | 25 | 33.09 | 30.83 | 33.16 | 1.44 | 1467.16 | 480.81 | 0.2 |
| 18 | 24.5 | 33.07 | 30.9 | 33.13 | 1.42 | 1468.54 | 470.48 | 0.2 |
| 17 | 24 | 33.03 | 30.31 | 33.1 | 1.52 | 1552.15 | 457.14 | 0.19 |
| 16 | 24 | 32.97 | 31.07 | 33.07 | 1.92 | 1317.5 | 432.3 | 0.24 |
| 15 | 24.77 | 32.97 | 30.72 | 33.05 | 1.72 | 1394.36 | 429.29 | 0.22 |
| 14 | 24.22 | 32.95 | 30.73 | 33.03 | 1.74 | 1458.66 | 447.41 | 0.21 |
| 13 | 24 | 32.94 | 30.14 | 33.01 | 1.54 | 1627.39 | 460.05 | 0.18 |
| 12 | 24 | 32.92 | 30.28 | 33 | 1.71 | 1498.94 | 468.16 | 0.21 |
| 11 | 24 | 32.9 | 29.85 | 32.98 | 1.7 | 1534.04 | 478.54 | 0.2 |
| 10 | 26.6 | 32.76 | 29.26 | 32.81 | 1.32 | 1541.4 | 339.82 | 0.17 |
| 9 | 22.13 | 32.6 | 29.1 | 32.69 | 1.78 | 1457.01 | 393.74 | 0.19 |
| 8 | 21.55 | 32.41 | 28.02 | 32.52 | 1.83 | 1229.94 | 243.81 | 0.19 |

Tabella 5-1 : Risultati della verifica mediante codice di calcolo HecRAS
Tr 25 anni, Q=1470 mc/sec (in rosso le sezioni al Ponte di Cintura)

| | | |
|---|---|-----------|
|  | Valutazione di compatibilità idraulica ai sensi della direttiva 2/99 della Autorità di Bacino del fiume Po del ponte ad archi sulla Linea di Cintura sul fiume Reno alla Pk 8+383 della Linea Ferroviaria Bologna-Verona | Redatto: |
| Oggetto: | Relazione idraulica | AP |


| Sezione | Min Ch El (m) | W.S. Elev (m) | Crit W.S. (m) | E.G. Elev (m) | Vel Chnl (m/s) | Flow Area (m ²) | Top Width (m) | Froude # Chl |
|-----------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|--------------------------------|------------------|--------------|
| 49 | 29.27 | 37.7 | 34.46 | 37.92 | 2.24 | 1085.87 | 249.17 | 0.28 |
| 48 | 28.39 | 37.55 | 34.9 | 37.72 | 2.25 | 1326.17 | 369.57 | 0.27 |
| 47 | 27.78 | 37.24 | 34.59 | 37.44 | 2.41 | 1186.05 | 286.61 | 0.29 |
| 46 | 27.43 | 37.06 | 34.44 | 37.34 | 2.65 | 986.85 | 222.27 | 0.32 |
| 45 | 28.3 | 36.57 | 34.17 | 37.01 | 3.84 | 803.95 | 232.62 | 0.44 |
| 44.5 BR U | 28.3 | 36.59 | 34.2 | 36.98 | 3.6 | 807.1 | 190.65 | 0.31 |
| 44.5 BR D | 28.3 | 36.42 | 34.19 | 36.85 | 3.72 | 775.91 | 186.25 | 0.32 |
| 44 | 28.3 | 36.34 | 34.17 | 36.82 | 4.02 | 760.02 | 225.21 | 0.47 |
| 43 | 27.87 | 36.38 | 33.25 | 36.58 | 2.19 | 1107.71 | 252.34 | 0.27 |
| 42 | 25.45 | 35.31 | 33.75 | 36.05 | 4.45 | 644.83 | 196.36 | 0.5 |
| 41 | 26.84 | 34.98 | 32.05 | 35.11 | 2.19 | 1403.02 | 353.44 | 0.28 |
| 40 | 27 | 34.98 | 31.82 | 35.08 | 2.06 | 1442.54 | 353.44 | 0.24 |
| 39 | 25.5 | 34.78 | 30.77 | 34.84 | 1.44 | 2072.29 | 438.74 | 0.16 |
| 38 | 25.5 | 34.7 | 31.83 | 34.81 | 2 | 1635.45 | 433.93 | 0.23 |
| 37 | 25.34 | 34.62 | 32.67 | 34.77 | 2.35 | 1468.99 | 441.14 | 0.27 |
| 36 | 25.5 | 34.53 | 32.87 | 34.72 | 2.55 | 1331.55 | 447.66 | 0.31 |
| 35 | 25.94 | 34.28 | 33.28 | 34.63 | 3.42 | 1013.58 | 449.2 | 0.43 |
| 34 | 25.5 | 34.28 | 32.74 | 34.52 | 2.87 | 1232.84 | 455.28 | 0.34 |
| 33 | 25.13 | 34.33 | 31.33 | 34.44 | 1.96 | 1640.06 | 461.39 | 0.24 |
| 32 | 25.5 | 34.25 | 32.65 | 34.4 | 2.27 | 1463.86 | 469.47 | 0.29 |
| 31 | 25.5 | 34.23 | 32.27 | 34.35 | 2.03 | 1598.37 | 473.15 | 0.25 |
| 30 | 25.5 | 34.22 | 31.47 | 34.32 | 1.76 | 1763.79 | 476.83 | 0.21 |
| 29 | 25.5 | 34.22 | 31.34 | 34.3 | 1.66 | 1855.54 | 482.11 | 0.2 |
| 28 | 25.5 | 34.21 | 31.34 | 34.29 | 1.58 | 1971.49 | 477.53 | 0.18 |
| 27 | 25.5 | 34.2 | 29.48 | 34.28 | 1.47 | 1911.54 | 485.94 | 0.17 |
| 26 | 25 | 34.19 | 29.48 | 34.27 | 1.5 | 1922.35 | 473.73 | 0.17 |
| 25 | 24.46 | 34.13 | 31.68 | 34.26 | 1.94 | 1493.51 | 468.1 | 0.24 |
| 24.5 BR U | 24.46 | 34.14 | 31.63 | 34.26 | 1.86 | 1426.4 | 396.4 | 0.16 |
| 24.5 BR D | 23.96 | 34.11 | 31.48 | 34.25 | 1.98 | 1422.72 | 400.31 | 0.17 |
| 24 | 23.96 | 34.12 | 31.42 | 34.25 | 1.96 | 1493.51 | 473.89 | 0.24 |
| 23 | 25 | 34.15 | 29.43 | 34.24 | 1.55 | 1854.21 | 478.84 | 0.18 |
| 22 | 25 | 34.15 | 29.54 | 34.22 | 1.47 | 1973.35 | 479.24 | 0.17 |
| 21 | 25 | 34.15 | 29.6 | 34.21 | 1.36 | 2118.52 | 491.62 | 0.16 |
| 20 | 24.64 | 34.15 | 30.9 | 34.2 | 1.34 | 2092.1 | 491.48 | 0.16 |
| 19 | 25 | 34.13 | 31.24 | 34.2 | 1.41 | 1978.12 | 494.12 | 0.18 |
| 18 | 24.5 | 34.12 | 31.28 | 34.18 | 1.39 | 1971.29 | 487.6 | 0.18 |
| 17 | 24 | 34.09 | 30.95 | 34.16 | 1.51 | 2041.69 | 468.76 | 0.17 |
| 16 | 24 | 34.05 | 31.46 | 34.13 | 1.82 | 1790.89 | 442.83 | 0.21 |
| 15 | 24.77 | 34.04 | 30.94 | 34.12 | 1.66 | 1869.14 | 450.48 | 0.19 |
| 14 | 24.22 | 34.03 | 31.24 | 34.1 | 1.68 | 1944.57 | 451.27 | 0.19 |
| 13 | 24 | 34.03 | 30.36 | 34.09 | 1.52 | 2127.71 | 464.09 | 0.16 |
| 12 | 24 | 34.01 | 30.94 | 34.08 | 1.64 | 2012.23 | 474.1 | 0.18 |
| 11 | 24 | 34 | 30.88 | 34.07 | 1.63 | 2061.3 | 483.7 | 0.18 |
| 10 | 26.6 | 33.87 | 29.57 | 33.93 | 1.4 | 1920.6 | 343.55 | 0.17 |
| 9 | 22.13 | 33.74 | 29.77 | 33.83 | 1.77 | 1910.44 | 398.12 | 0.18 |
| 8 | 21.55 | 33.55 | 28.98 | 33.67 | 1.97 | 1509.6 | 248.01 | 0.19 |

*Tabella 5-2: Risultati della verifica mediante codice di calcolo HecRAS
Tr 100 anni, Q=1970 mc/sec (in rosso le sezioni al Ponte di Cintura)*

| | | |
|---|---|-----------|
|  | Valutazione di compatibilità idraulica ai sensi della direttiva 2/99 della Autorità di Bacino del fiume Po del ponte ad archi sulla Linea di Cintura sul fiume Reno alla Pk 8+383 della Linea Ferroviaria Bologna-Verona | Redatto: |
| Oggetto: | Relazione idraulica | AP |

| Sezione | Min Ch El (m) | W.S. Elev (m) | Crit W.S. (m) | E.G. Elev (m) | Vel Chnl (m/s) | Flow Area (m ²) | Top Width (m) | Froude # Chl |
|-----------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|--------------------------------|------------------|--------------|
| 49 | 29.27 | 38.09 | 34.90 | 38.33 | 2.35 | 1185.32 | 262.61 | 0.29 |
| 48 | 28.39 | 37.95 | 35.14 | 38.13 | 2.32 | 1478.49 | 387.40 | 0.27 |
| 47 | 27.78 | 37.65 | 34.79 | 37.86 | 2.53 | 1310.85 | 324.65 | 0.30 |
| 46 | 27.43 | 37.46 | 34.68 | 37.76 | 2.77 | 1077.49 | 234.53 | 0.32 |
| 45 | 28.30 | 36.94 | 34.60 | 37.42 | 4.05 | 875.59 | 244.93 | 0.46 |
| 44.5 BR U | 28.30 | 36.96 | 34.49 | 37.39 | 3.77 | 879.57 | 198.20 | 0.31 |
| 44.5 BR D | 28.30 | 36.79 | 34.49 | 37.25 | 3.91 | 845.68 | 195.13 | 0.33 |
| 44 | 28.30 | 36.69 | 34.69 | 37.22 | 4.24 | 826.58 | 235.34 | 0.49 |
| 43 | 27.87 | 36.75 | 33.48 | 36.97 | 2.30 | 1201.52 | 260.20 | 0.28 |
| 42 | 25.45 | 35.62 | 34.08 | 36.41 | 4.66 | 707.60 | 208.18 | 0.51 |
| 41 | 26.84 | 35.38 | 32.23 | 35.51 | 2.22 | 1542.40 | 354.92 | 0.27 |
| 40 | 27.00 | 35.37 | 31.98 | 35.48 | 2.08 | 1582.09 | 354.92 | 0.23 |
| 39 | 25.50 | 35.19 | 30.96 | 35.26 | 1.49 | 2252.97 | 445.16 | 0.17 |
| 38 | 25.50 | 35.11 | 31.99 | 35.22 | 2.02 | 1815.73 | 439.57 | 0.23 |
| 37 | 25.34 | 35.04 | 32.86 | 35.19 | 2.34 | 1656.82 | 446.33 | 0.26 |
| 36 | 25.50 | 34.97 | 33.16 | 35.14 | 2.49 | 1528.64 | 452.29 | 0.29 |
| 35 | 25.94 | 34.79 | 33.54 | 35.07 | 3.17 | 1242.99 | 453.73 | 0.38 |
| 34 | 25.50 | 34.78 | 32.96 | 34.99 | 2.72 | 1463.83 | 462.45 | 0.31 |
| 33 | 25.13 | 34.82 | 32.24 | 34.92 | 1.92 | 1866.25 | 465.16 | 0.23 |
| 32 | 25.50 | 34.76 | 32.80 | 34.88 | 2.17 | 1701.68 | 472.19 | 0.26 |
| 31 | 25.50 | 34.74 | 32.43 | 34.85 | 1.97 | 1839.25 | 476.44 | 0.23 |
| 30 | 25.50 | 34.73 | 31.70 | 34.82 | 1.74 | 2006.44 | 479.97 | 0.20 |
| 29 | 25.50 | 34.72 | 31.50 | 34.80 | 1.64 | 2100.77 | 484.50 | 0.19 |
| 28 | 25.50 | 34.72 | 31.48 | 34.79 | 1.57 | 2214.82 | 482.16 | 0.18 |
| 27 | 25.50 | 34.70 | 29.81 | 34.78 | 1.47 | 2158.99 | 487.72 | 0.17 |
| 26 | 25.00 | 34.70 | 29.80 | 34.78 | 1.51 | 2163.94 | 477.71 | 0.17 |
| 25 | 24.46 | 34.65 | 31.95 | 34.77 | 1.91 | 1717.24 | 476.16 | 0.23 |
| 24.5 BR U | 24.46 | 34.65 | 31.88 | 34.77 | 1.82 | 1632.18 | 400.49 | 0.15 |
| 24.5 BR D | 23.96 | 34.63 | 31.79 | 34.76 | 1.96 | 1629.34 | 400.67 | 0.16 |
| 24 | 23.96 | 34.64 | 31.80 | 34.76 | 1.91 | 1719.70 | 477.71 | 0.22 |
| 23 | 25.00 | 34.66 | 29.77 | 34.75 | 1.56 | 2102.00 | 485.68 | 0.17 |
| 22 | 25.00 | 34.66 | 29.89 | 34.74 | 1.48 | 2220.78 | 489.67 | 0.17 |
| 21 | 25.00 | 34.66 | 30.46 | 34.72 | 1.37 | 2371.10 | 493.45 | 0.15 |
| 20 | 24.64 | 34.66 | 31.09 | 34.72 | 1.34 | 2345.05 | 494.39 | 0.16 |
| 19 | 25.00 | 34.65 | 31.39 | 34.71 | 1.40 | 2233.04 | 495.78 | 0.17 |
| 18 | 24.50 | 34.63 | 31.44 | 34.69 | 1.38 | 2224.21 | 491.02 | 0.17 |
| 17 | 24.00 | 34.61 | 31.17 | 34.68 | 1.51 | 2285.18 | 469.68 | 0.17 |
| 16 | 24.00 | 34.57 | 31.74 | 34.65 | 1.79 | 2023.51 | 444.50 | 0.20 |
| 15 | 24.77 | 34.57 | 31.32 | 34.64 | 1.65 | 2105.61 | 451.57 | 0.19 |
| 14 | 24.22 | 34.56 | 31.39 | 34.63 | 1.66 | 2182.58 | 455.38 | 0.18 |
| 13 | 24.00 | 34.55 | 30.93 | 34.61 | 1.52 | 2372.28 | 465.51 | 0.16 |
| 12 | 24.00 | 34.54 | 31.21 | 34.60 | 1.62 | 2263.37 | 475.74 | 0.18 |
| 11 | 24.00 | 34.53 | 31.21 | 34.59 | 1.61 | 2318.35 | 486.05 | 0.17 |
| 10 | 26.60 | 34.40 | 29.73 | 34.47 | 1.44 | 2104.63 | 345.34 | 0.17 |
| 9 | 22.13 | 34.29 | 30.39 | 34.37 | 1.77 | 2128.23 | 400.08 | 0.17 |
| 8 | 21.55 | 34.09 | 29.46 | 34.22 | 2.03 | 1644.53 | 250.01 | 0.19 |

*Tabella 5-3: Risultati della verifica mediante codice di calcolo HecRAS
Tr 200 anni, Q=2232 mc/sec (in rosso le sezioni al Ponte di Cintura)*

| | | |
|---|---|-----------|
|  | Valutazione di compatibilità idraulica ai sensi della direttiva 2/99 della Autorità di Bacino del fiume Po del ponte ad archi sulla Linea di Cintura sul fiume Reno alla Pk 8+383 della Linea Ferroviaria Bologna-Verona | Redatto: |
| Oggetto: | Relazione idraulica | AP |

Dalle verifiche eseguite nel tratto di studio emerge che un evento di piena con tempo di ritorno di 200 anni risulta ampiamente contenuto all'interno dell'alveo.

In particolare considerata la portata con tempo di ritorno di 200 anni come portata di progetto, si riscontra il rispetto del franco minimo tra la quota idrometrica relativa alla piena e la quota di intradosso del ponte che "deve essere non inferiore a 0.5 volte l'altezza cinetica della corrente e comunque non inferiore ad 1.0 m, inoltre per ponti ad arco tale franco deve esser garantito per almeno 2/3 della luce" (§3.1 "Direttiva contenente i criteri per la valutazione della compatibilità idraulica delle infrastrutture pubbliche e di interesse pubblico", AdB Po).

| liv. idr. 200 (m) | h chiave arcate esterno (m) | h chiave arcate centro ponte (m) | franco esterno (m) | franco centro (m) |
|-------------------|-----------------------------|----------------------------------|--------------------|-------------------|
| 34.7 | 40.3 | 40.7 | 5.60 | 6.00 |

Tabella 5-4: Franco idraulico al Ponte di Cintura Per $Tr = 200$ anni

| liv. idr. 200 (m) | h intradosso esterno (m) | h chiave arcate centro ponte (m) | franco esterno (m) | franco centro (m) |
|-------------------|--------------------------|----------------------------------|--------------------|-------------------|
| 37.19 | 39.64 | 40.12 | 2.45 | 2.93 |

Tabella 5-5: Franco idraulico al Ponte della Tangenziale Per $Tr = 200$ anni

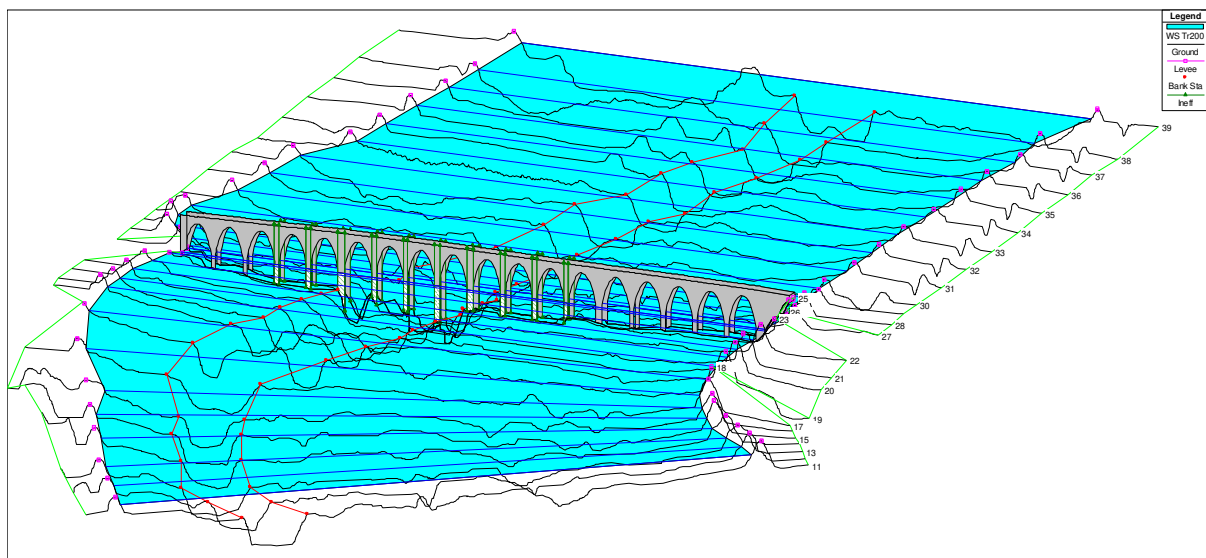



Figura 5.6: Visione tridimensionale della modellazione idraulica

| | | |
|---|--|----------|
|  | Valutazione di compatibilità idraulica ai sensi della direttiva 2/99 della Autorità di Bacino del fiume Po del ponte ad archi sulla Linea di Cintura sul fiume Reno alla Pk 8+383 della Linea Ferroviaria Bologna-Verona | Redatto: |
| Oggetto: | Relazione idraulica | AP |

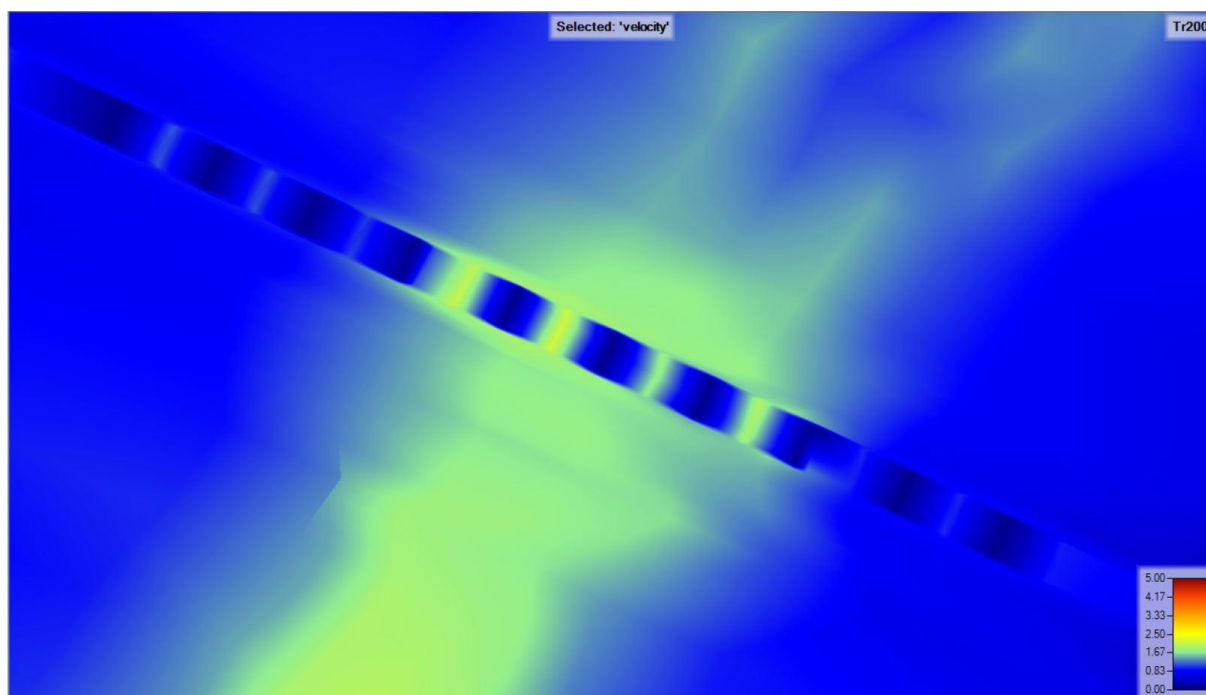



Figura 5.7: Visione bidimensionale dei valori di velocità alle pile del ponte con Tr 200

| | | |
|---|--|----------|
|  | Valutazione di compatibilità idraulica ai sensi della direttiva 2/99 della Autorità di Bacino del fiume Po del ponte ad archi sulla Linea di Cintura sul fiume Reno alla Pk 8+383 della Linea Ferroviaria Bologna-Verona | Redatto: |
| Oggetto: | Relazione idraulica | AP |

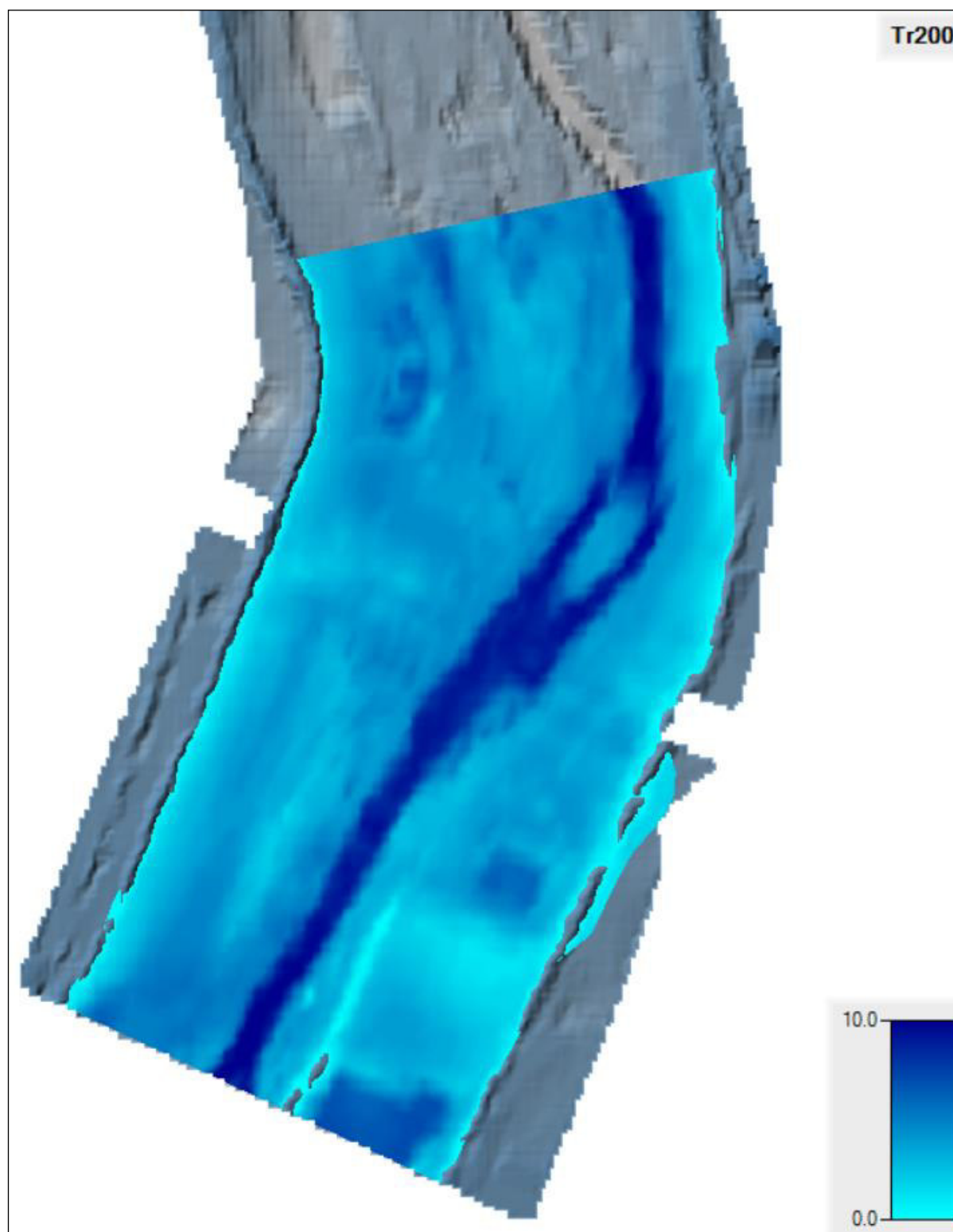



Figura 5.8: Visualizzazione bidimensionale dei livelli idrici per Tr 200 anni su DEM

La figura sopra presenta l'area di inondazione della piena 200 anni, visibilmente contenuta all'interno delle arginature (visibile anche nel modello 3D).

| | | |
|---|--|----------|
|  | Valutazione di compatibilità idraulica ai sensi della direttiva 2/99 della Autorità di Bacino del fiume Po del ponte ad archi sulla Linea di Cintura sul fiume Reno alla Pk 8+383 della Linea Ferroviaria Bologna-Verona | Redatto: |
| Oggetto: | Relazione idraulica | AP |

Nonostante l'attraversamento risulti adeguato alla piena di progetto, si sono voluti analizzare ulteriori due casi corrispondenti al livello di guardia ed al livello di sicurezza.

Per quanto riguarda il significato di livello di guardia e sicurezza ci si riferisce a quanto contenuto nelle “*Procedure e interventi di protezione della sede dai fenomeni di dissesto idrogeologico (RFI DTC INC LG IFS 002 C)*”

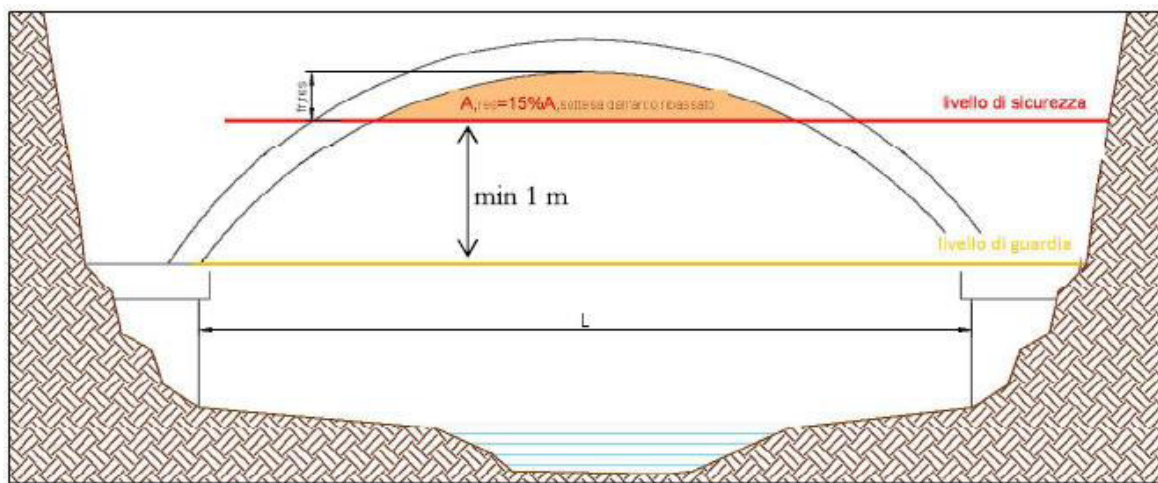


Figura 5.9: Livello di guardia e di sicurezza per ponte ad arco (Da RFI DTC INC LG IFS 002 C)

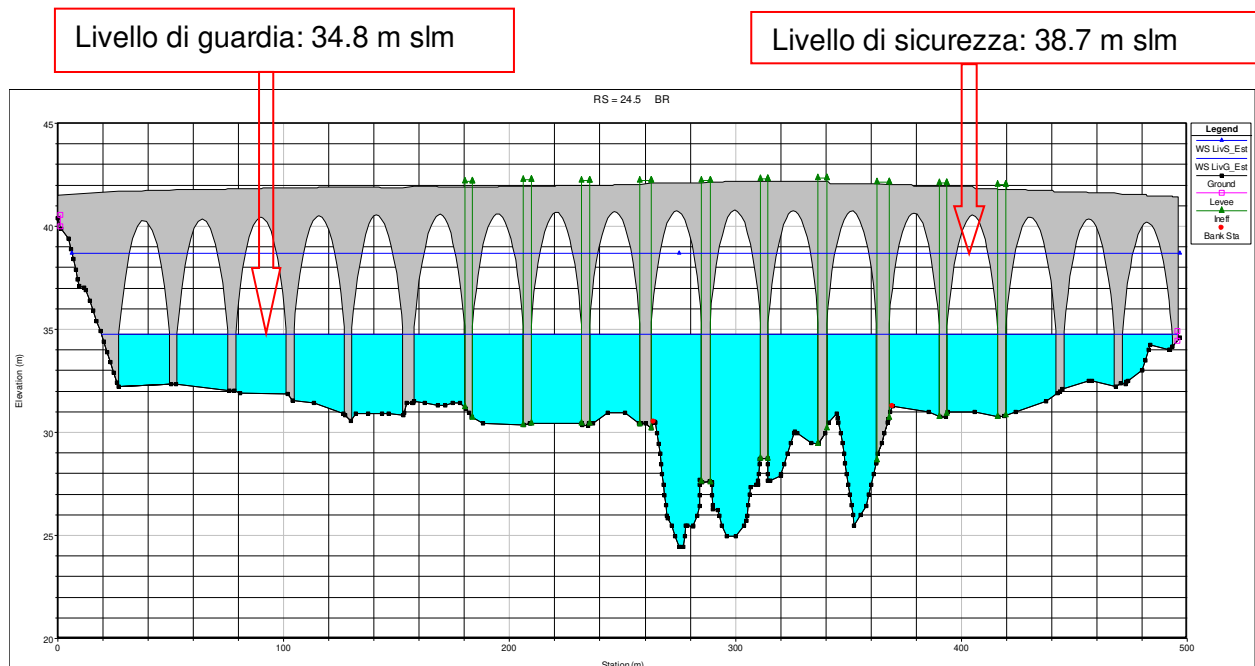



Figura 5.10: Livelli di guardia e di sicurezza per il Ponte di Cintura

Verifica sulle arcate esterne

| | | |
|---|---|-----------|
|  | <i>Valutazione di compatibilità idraulica ai sensi della direttiva 2/99 della Autorità di Bacino del fiume Po del ponte ad archi sulla Linea di Cintura sul fiume Reno alla Pk 8+383 della Linea Ferroviaria Bologna-Verona</i> | Redatto: |
| Oggetto: | <i>Relazione idraulica</i> | AP |

- Nel primo caso il livello di guardia viene raggiunto quando il pelo libero lambisce la quota di imposta degli archi esterni (34.8 m slm); il raggiungimento di tale quota avviene con una portata $Q=2300$ mc/s (corrispondente ad un $Tr = 250$ anni);
- Nel secondo caso quando la quota idrica raggiunge il livello di sicurezza (quota per la quale la superficie libera della regione sottesa dall'arco si riduce al 15% dell'iniziale) è necessario interrompere la circolazione. Tale quota (38.7 m slm) viene raggiunta per una portata $Q= 4800$ mc/s (corrispondente ad un Tr superiore ai mille anni);


5.4 Dettagli analisi Post Operam

Per lo stato Post Operam è stato analizzato lo stesso tratto di alveo di uguale lunghezza, come nello stato Ante Operam.

In questa fase però sono state inserite e modificate alcune sezioni, sia a monte che a valle del Ponte di Cintura, per modellare la rampa di accompagnamento alla soglia e lo scivolo a valle di quest'ultima. Le modifiche effettuate sono le seguenti:

1. Inserimento di sezioni **n. 26.6 e n. 26.4** tra le sezioni n.27 e n.26. Tali sezioni descrivono l'andamento della rampa di accompagnamento alla soglia di nuova costruzione. Il coefficiente di scabrezza adottato per la rampa in massi lapidei di grandi dimensioni è di $0.05 \text{ s/m}^{-1/3}$;
2. Modifica delle sezioni **n. 26, 25, 24, 23**. Queste sezioni descrivono la soglia in C.A. fondata su pali di nuova costruzione. In queste sezioni è stato alzato e regolarizzato il fondo. Inoltre è stato modificato il coefficiente di scabrezza pari a $0.02 \text{ s/m}^{-1/3}$ (per calcestruzzo);
3. Inserimento della sezione **n. 22.5** tra le sezioni n.23 e n.22, che descrive la fine dello scivolo in massi ciclopici. Anche per questo tratto è stato utilizzato un coefficiente di scabrezza di $0.05 \text{ s/m}^{-1/3}$;
4. Inserimento della sezione **n. 21.7** seguente la sezione n.22, che descrive la fine del rivestimento in RIPRAP in massi ciclopici. Tale tratto risulta in piano e riaccordato con l'attuale fondo alveo. Anche per questo tratto è stato utilizzato un coefficiente di scabrezza di $0.05 \text{ s/m}^{-1/3}$;

Di seguito un'immagine riassuntiva di quanto scritto sopra.

| | | |
|---|---|-----------|
|  | Valutazione di compatibilità idraulica ai sensi della direttiva 2/99 della Autorità di Bacino del fiume Po del ponte ad archi sulla Linea di Cintura sul fiume Reno alla Pk 8+383 della Linea Ferroviaria Bologna-Verona | Redatto: |
| Oggetto: | Relazione idraulica | AP |

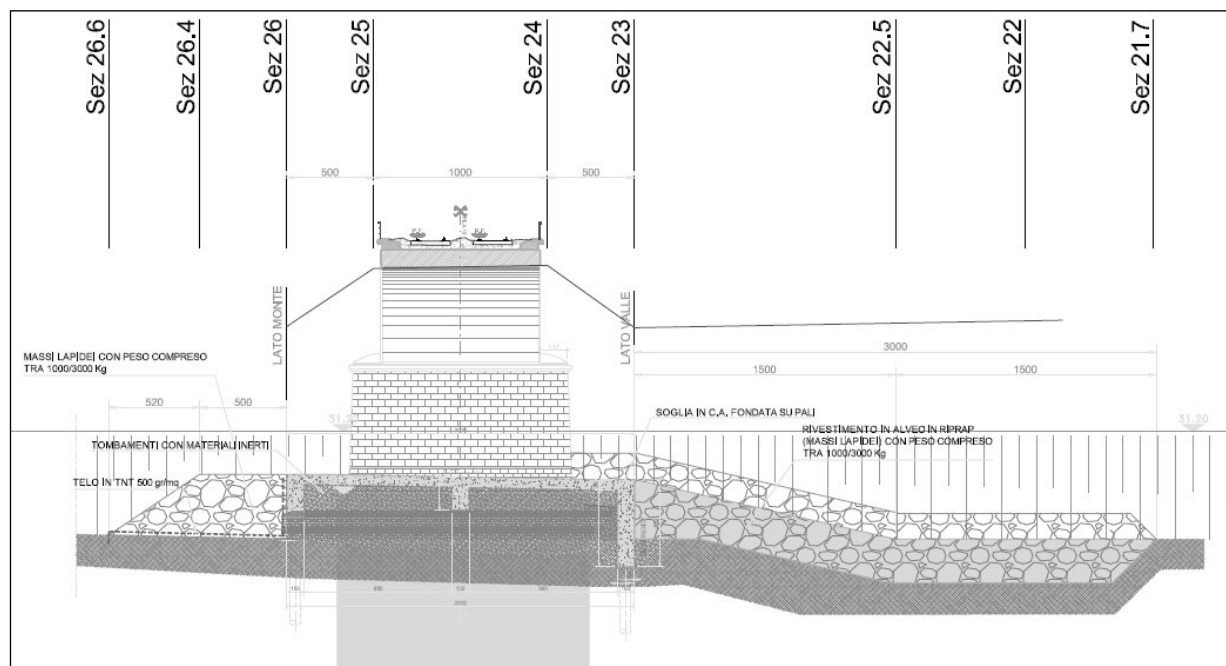


Figura 5.11: Profilo alveo Post Operam

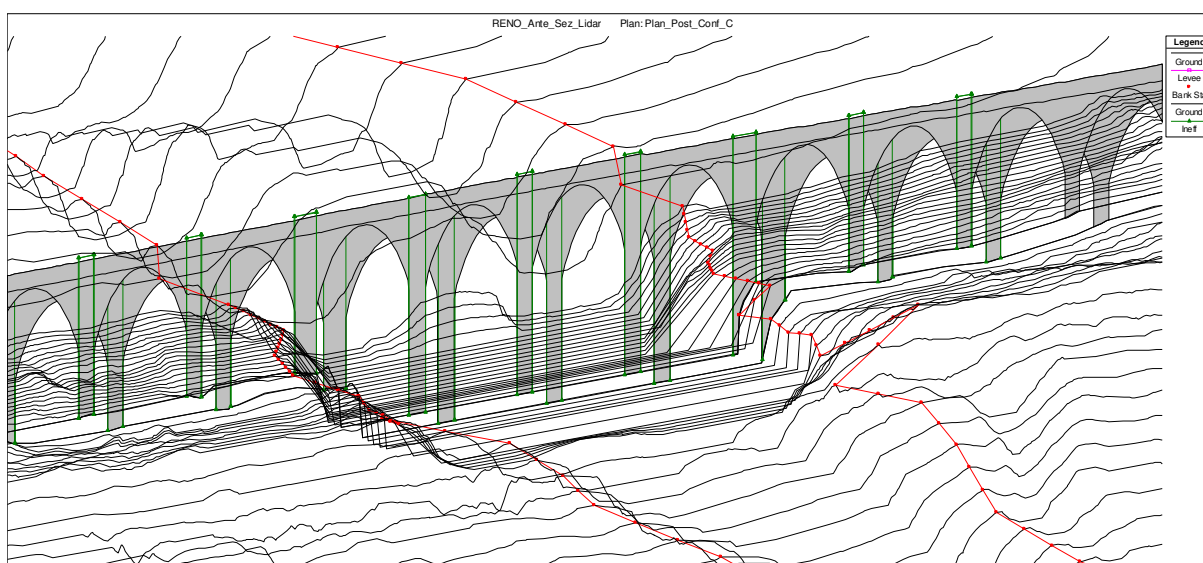



Figura 5.12: immagine tridimensionale nuova riprofilatura lato di monte

| | | |
|---|---|-----------|
|  | Valutazione di compatibilità idraulica ai sensi della direttiva 2/99 della Autorità di Bacino del fiume Po del ponte ad archi sulla Linea di Cintura sul fiume Reno alla Pk 8+383 della Linea Ferroviaria Bologna-Verona | Redatto: |
| Oggetto: | Relazione idraulica | AP |

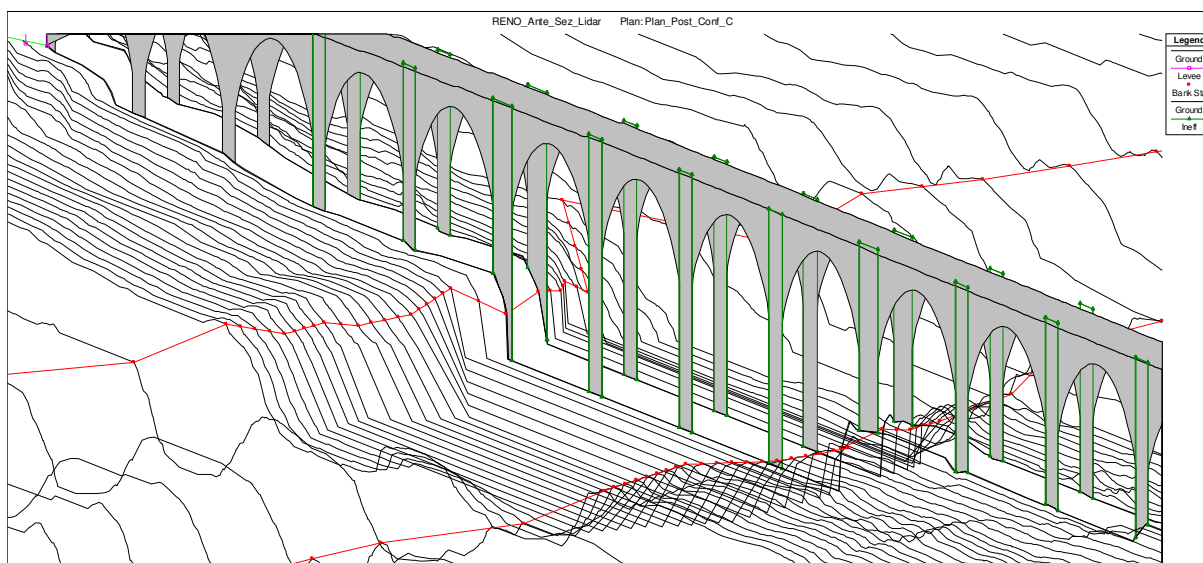



Figura 5.13: immagine tridimensionale nuova riprofilatura lato di valle

5.5 Risultati analisi Post Operam

Per lo stato Post Operam è stato analizzato il medesimo tratto di alveo, come nello stato Ante Operam. Si ricordano le modifiche alle sezioni in corrispondenza del ponte di Cintura, sia a monte che a valle, per modellare la rampa di accompagnamento alla soglia e lo scivolo a valle di quest'ultima.

Per la ricostruzione dei profili di piena nella configurazione a lungo termine, ossia con la zona a monte della soglia occupata dal materiale depositato, le sezioni di monte sono state modificate utilizzando il tool Cross section fixed sediment elevation. La zona a monte della soglia viene quindi "riempita" da un volume di sedimenti procedendo verso monte con pendenza di equilibrio fino all'intersezione con l'alveo originale. Il profilo altimetrico del fondo alveo e una vista tridimensionale della zona d'alveo inciso occupata dal deposito sono riportate in figura 5.14 e figura 5.15 rispettivamente.

| | | |
|---|---|-----------|
|  | Valutazione di compatibilità idraulica ai sensi della direttiva 2/99 della Autorità di Bacino del fiume Po del ponte ad archi sulla Linea di Cintura sul fiume Reno alla Pk 8+383 della Linea Ferroviaria Bologna-Verona | Redatto: |
| Oggetto: | Relazione idraulica | AP |

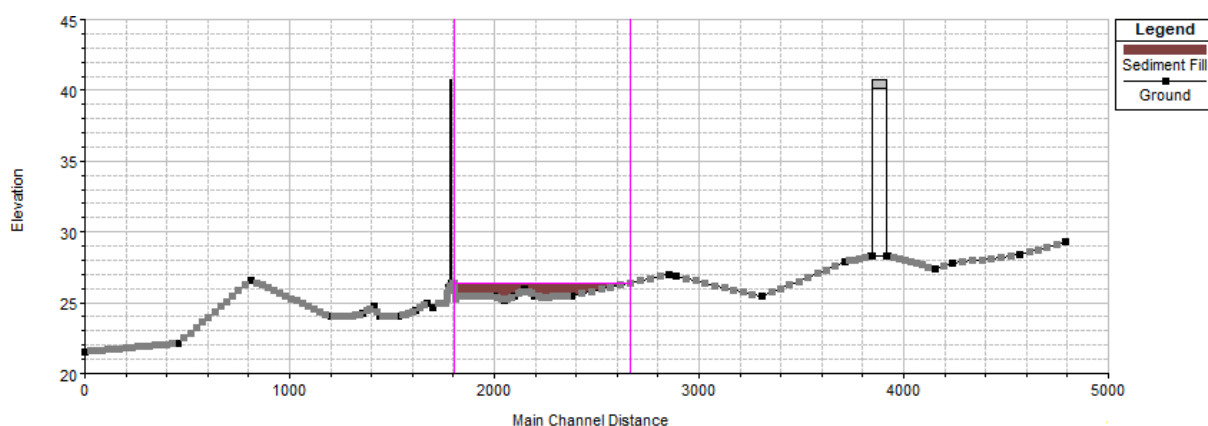


Figura 5.14 - Profilo longitudinale del corso d'acqua nella configurazione C a lungo termine nel modello HEC RAS

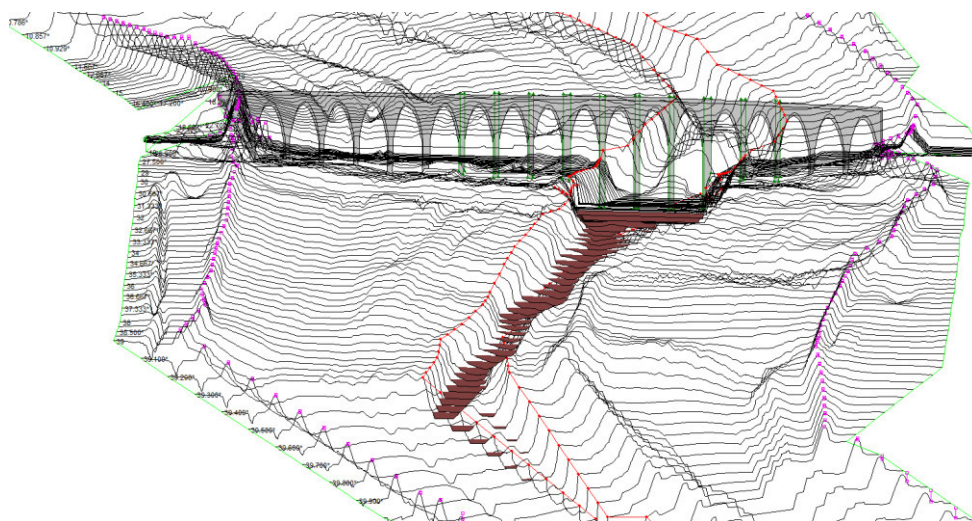


Figura 5.15 - Vista tridimensionale del tratto di alveo occupato dal deposito a monte della soglia nel modello HEC RAS.

In tal modo le verifiche della configurazione “Post Operam” si riferiscono a due fattispecie, “a breve” ovvero al termine della costruzione della soglia, ed “a lungo termine” ovvero una volta completato il processo di deposizione dei sedimenti a monte della soglia stessa secondo il profilo di equilibrio.

Le verifiche idrauliche hanno mostrato che un evento con tempo di ritorno di 200 anni è contenuto nell'alveo senza che si manifestino fenomeni di tracimazione sia nella condizione a breve che a lungo termine . Nelle tabelle seguenti si riportano i valori del franco idraulico in corrispondenza del ponte di cintura e del Ponte della Tangenziale per le due condizioni analizzate “breve e lungo termine”.


| | | |
|---|---|-----------|
|  | Valutazione di compatibilità idraulica ai sensi della direttiva 2/99 della Autorità di Bacino del fiume Po del ponte ad archi sulla Linea di Cintura sul fiume Reno alla Pk 8+383 della Linea Ferroviaria Bologna-Verona | Redatto: |
| Oggetto: | Relazione idraulica | AP |

Tabella 5.6: Franco idraulico al ponte di Cintura per Q Tr 200 anni – breve termine.

| Alternativa | liv. idr. 200 (m) | h chiave arcate esterno (m) | h chiave arcate centro ponte (m) | franco esterno (m) | franco centro (m) |
|-------------|-------------------|-----------------------------|----------------------------------|--------------------|-------------------|
| Ante operam | 34.67 | 40.3 | 40.7 | 5.60 | 6.00 |
| c | 34.74 | 40.3 | 40.7 | 5.56 | 5.96 |

Tabella 5.7: Franco idraulico al ponte di Cintura per Q Tr 200 anni – lungo termine.

| Alternativa | liv. idr. 200 (m) | h chiave arcate esterno (m) | h chiave arcate centro ponte (m) | franco esterno (m) | franco centro (m) |
|-------------|-------------------|-----------------------------|----------------------------------|--------------------|-------------------|
| Ante operam | 34.67 | 40.3 | 40.7 | 5.60 | 6.00 |
| c | 34.74 | 40.3 | 40.7 | 5.56 | 5.96 |

La portata di progetto ($Q=2232$ mc/s) garantisce ovunque il rispetto del franco minimo.

Tabella 5.8: Franco idraulico al ponte della tangenziale per Q Tr 200 anni – post operam.

| Alternativa | liv. idr. 200 (m) | h intradosso esterno (m) | h intradosso centro ponte (m) | franco esterno (m) | franco centro (m) |
|-------------|-------------------|--------------------------|-------------------------------|--------------------|-------------------|
| Ante operam | 37.19 | 39.64 | 40.12 | 2.45 | 2.93 |
| c | 37.20 | 39.64 | 40.12 | 2.44 | 2.92 |


Tabella 5.9: Franco idraulico al ponte della tangenziale per Q Tr 200 anni – lungo termine.

| Alternativa | liv. idr. 200 (m) | h intradosso esterno (m) | h intradosso centro ponte (m) | franco esterno (m) | franco centro (m) |
|-------------|-------------------|--------------------------|-------------------------------|--------------------|-------------------|
| Ante operam | 37.19 | 39.64 | 40.12 | 2.45 | 2.93 |
| c | 37.21 | 39.64 | 40.12 | 2.43 | 2.91 |

Le verifiche idrauliche hanno mostrato che un evento con tempo di ritorno di 200 anni è contenuto nell'alveo senza che si manifestino fenomeni di tracimazione.

Tale portata di progetto ($Q=2232$ mc/s) garantisce il rispetto del franco minimo come indicato al §5.3.

In particolare mediante la soglia in C.A. aumentano le velocità causando l'abbassamento del livello idrico. Lo scivolo in massi ciclopici permette la dissipazione di energia, riportando i valori delle velocità come nello stato ante operam subito a valle dell'opera.

| | | |
|---|--|----------|
|  | Valutazione di compatibilità idraulica ai sensi della direttiva 2/99 della Autorità di Bacino del fiume Po del ponte ad archi sulla Linea di Cintura sul fiume Reno alla Pk 8+383 della Linea Ferroviaria Bologna-Verona | Redatto: |
| Oggetto: | Relazione idraulica | AP |

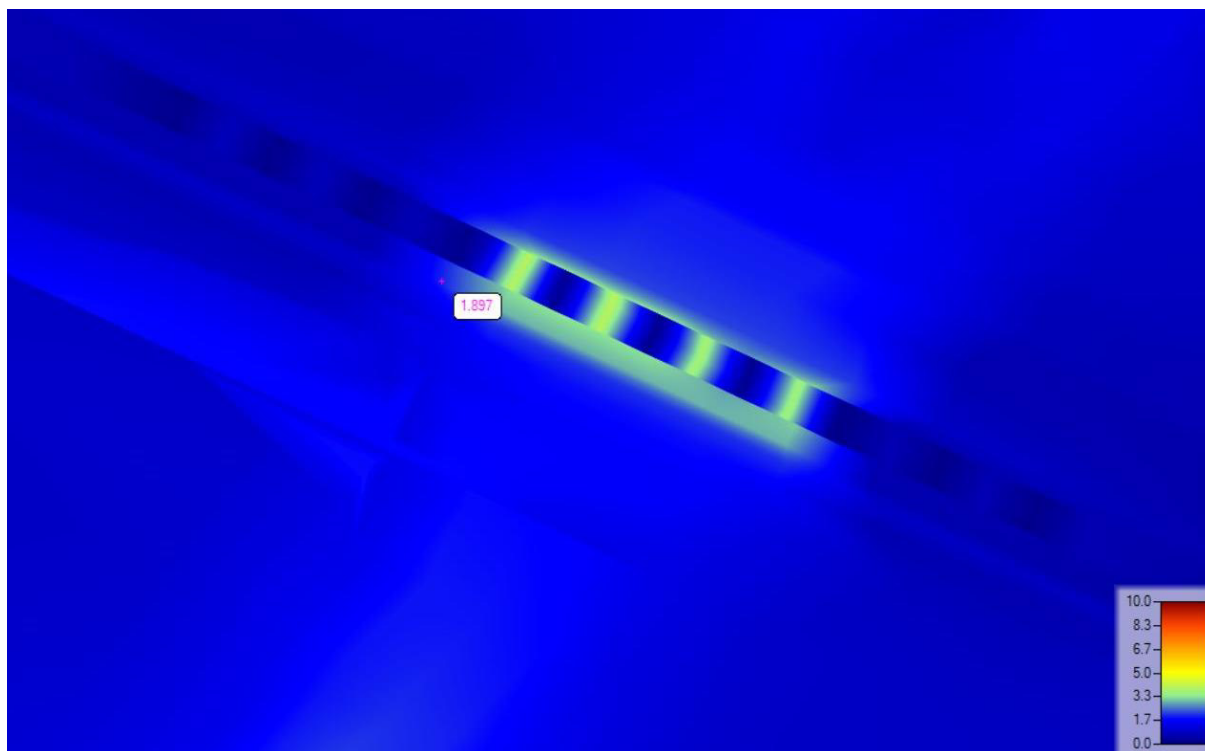



Figura 5.11: Visione bidimensionale dei valori di velocità alle pile del ponte con Tr 200 post operam

Per quanto riguarda il significato di livello di guardia e sicurezza ci si riferisce a quanto già indicato al §5.3.

- Nel primo caso il livello di guardia viene raggiunto quando il pelo libero lambisce la quota di imposta degli archi esterni (34.8 m slm); il raggiungimento di tale quota avviene con una portata $Q = 2300 \text{ mc/s}$ (corrispondente ad un $Tr = 250$ anni);
- Nel secondo caso quando la quota idrica raggiunge il livello di sicurezza (quota per la quale la superficie libera della regione sottesa dall'arco si riduce al 15% dell'iniziale) è necessario interrompere la circolazione. Tale quota (38.7 m slm) viene raggiunta per una portata $Q = 4900 \text{ mc/s}$ (corrispondente ad un Tr superiore ai mille anni);

| | | |
|---|--|----------|
|  | Valutazione di compatibilità idraulica ai sensi della direttiva 2/99 della Autorità di Bacino del fiume Po del ponte ad archi sulla Linea di Cintura sul fiume Reno alla Pk 8+383 della Linea Ferroviaria Bologna-Verona | Redatto: |
| Oggetto: | Relazione idraulica | AP |

6. CALCOLO DELLA EROSIONE IN CORRISPONDENZA DELLE PILE DEL PONTE E DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE DI PROTEZIONE

6.1 Generalità

Nell'intorno di un ostacolo posto in un alveo (una o più pile), rapide variazioni di intensità e di distribuzione delle velocità di una corrente possono provocare fenomeni di erosione localizzata, specie quando l'alveo sia composto da materiale incoerente.

La presenza di una pila in alveo causa un aumento della velocità resa manifesta dall'addensamento delle linee di corrente; contestualmente si ha la formazione di un grosso vortice detto a ferro di cavallo che è il principale responsabile dell'erosione e che interessa planimetricamente tutta l'area circostante la pila.

Nella figura seguente si schematizza l'andamento del fenomeno descritto.

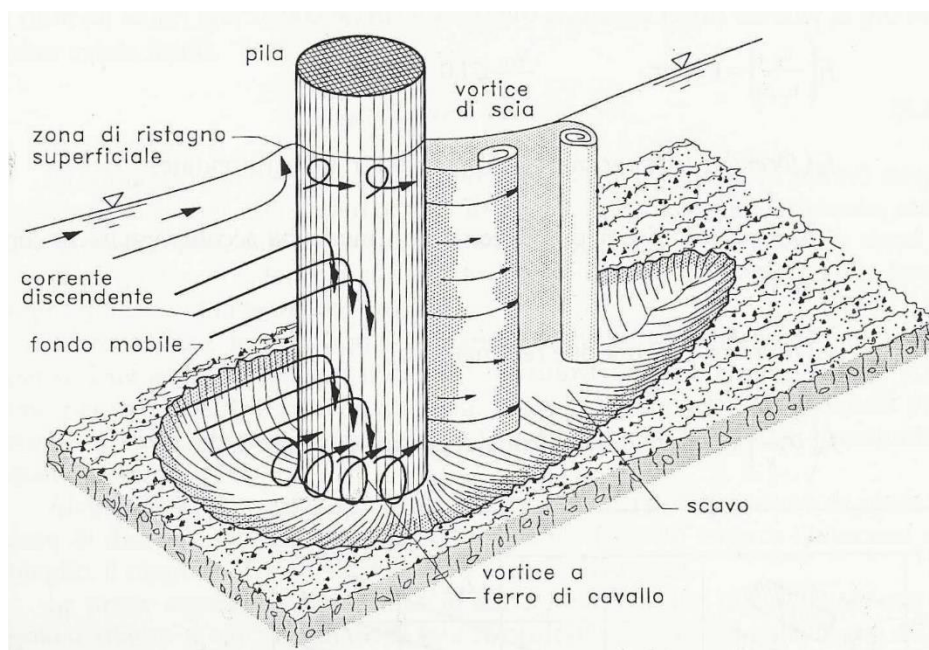



Fig.6.1 Erosione provocata da una pila da ponte

Il tema degli scavi di cui le opere in alveo possono dare luogo è da completare trattando anche di quelli che le spalle di un ponte possono produrre. Infatti quando esse creano una riduzione della sezione di deflusso, ciascuna spalla protesa in alveo induce la formazione di vortici che danno luogo al suo piede di scavi in analogia a quanto avviene al piede di una pila.

| | | |
|---|---|-----------|
|  | <i>Valutazione di compatibilità idraulica ai sensi della direttiva 2/99 della Autorità di Bacino del fiume Po del ponte ad archi sulla Linea di Cintura sul fiume Reno alla Pk 8+383 della Linea Ferroviaria Bologna-Verona</i> | Redatto: |
| Oggetto: | <i>Relazione idraulica</i> | AP |


La massima profondità di scavo è legata a molti fattori tra i quali si ricordano:

- le caratteristiche granulometriche del materiale di fondo alveo nel tratto del ponte (diametro dei sedimenti e loro distribuzione in frequenza, forma dei grani, presenza di un certo grado di coesione, peso specifico);
- l'esistenza di apporti solidi da monte in caso di piena che sono in grado, durante il transitorio del passaggio dell'onda di piena, di rimpiazzare i sedimenti rimossi;
- la durata dell'evento di piena in rapporto al tempo necessario alla rimozione del materiale e al raggiungimento di una condizione di stabilità dello scavo;
- la forma e le dimensioni (ingombro, rapporto lunghezza/larghezza) delle pile;
- la profondità, la velocità media e la distribuzione di velocità della corrente indisturbata;
- l'angolo di attacco della corrente, cioè l'angolo che la corrente stessa forma con l'asse longitudinale della pila;
- il grado di restringimento della sezione del ponte.

Nel caso dell'attraversamento in esame, le verifiche di scalzamento delle pile non sono state effettuate in quanto la presenza della soglia risolve il problema alla radice.

Viceversa tenuto conto del fatto che la soglia verrà realizzata ad una quota pari al livello dell'alveo originario quindi superiore rispetto all'attuale quota di fondo alveo, il dislivello risultante tra monte e valle dovrà essere raccordato con uno scivolo in pietrame.

Pertanto nel seguito del paragrafo vengono proposte le verifiche dello scivolo in pietrame al fine di garantire la stabilità dei massi nei confronti dell'azione di trascinamento operata dalla corrente.

| | | |
|---|---|-----------|
|  | <i>Valutazione di compatibilità idraulica ai sensi della direttiva 2/99 della Autorità di Bacino del fiume Po del ponte ad archi sulla Linea di Cintura sul fiume Reno alla Pk 8+383 della Linea Ferroviaria Bologna-Verona</i> | Redatto: |
| Oggetto: | <i>Relazione idraulica</i> | AP |

6.2 Protezione a valle della soglia con scivolo in pietrame

Per il dimensionamento dei massi ciclopici a valle ed a monte della soglia si è fatto riferimento sia al confronto tra la velocità critica di trascinamento dei massi ciclopici e la velocità massima, in corrispondenza dello scivolo, pari a 3,85 m/s:

Confronto velocità:

$$V_0 < \mu 0.425 \sqrt{2gd \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right)}$$

V_0 = velocità in prossimità della pila da proteggere (3,85 m/s);

μ = coefficiente di sicurezza pari a 2;

γ_s = peso specifico materiale lapideo (2600 kg/m³);

γ = peso specifico dell'acqua (981 kg/m³);

Inoltre si è fatto riferimento alle seguenti formule empiriche:

Richardson e Davis (1995):

$$Dr_{50} = \frac{0.346 K_1^2 K_2^2 V^2}{(S_s - 1)g}$$

K_1 = 1.7 pila rettangolare; **1.5 pila arrotondata**;

K_2 = **0.9 per canale rettilineo**; 1.7 per canale in curva;


V = velocità in prossimità della pila da proteggere (3,85 m/s);

S_s = densità relativa dei massi ($\gamma_s/\gamma_{\text{acqua}}$);

Austroads:

$$Dr_{50} = \frac{0.58 K_1 K_2 V^2}{(S_s - 1)g}$$

K_1 = **2.89 pila rettangolare**; 2.25 pila arrotondata;

| | | |
|---|---|-----------|
|  | Valutazione di compatibilità idraulica ai sensi della direttiva 2/99 della Autorità di Bacino del fiume Po del ponte ad archi sulla Linea di Cintura sul fiume Reno alla Pk 8+383 della Linea Ferroviaria Bologna-Verona | Redatto: |
| Oggetto: | Relazione idraulica | AP |

$K_2 = 0.81$ per canale rettilineo; 2.89 per canale in curva;

V = velocità in prossimità della pila da proteggere (3,85 m/s);

S_s = densità relativa dei massi (γ_s/γ_{acqua});

Si riportano in tabella i risultati ottenuti:

| | Dr_{50} |
|--------------------------------|-----------------------------|
| Confronto velocità (cm) | 63 |
| Richardson e Davis (cm) | 58 |
| Austroads (cm) | 96 |

Pertanto per un corretto dimensionamento dei massi ciclopici a protezione delle pile si ritiene di considerare, a favore di sicurezza, la dimensione massima ottenuta dalle altre tre formule, ossia massi aventi un Dr_{50} maggiore di 1.00m.

Poiché le gettate di massi possono subire il collasso per:

- effetto degli sforzi tangenziali;
- cedimento ai bordi;
- sotto-escavazione;

Il collasso per sforzo tangenziale verrà mitigato da blocchi sufficientemente grandi e l'appropriata progettazione della gettata scongiurerà fenomeni di cedimento. Per quanto riguarda la sotto-escavazione, questa verrà evitata predisponendo al di sotto della gettata un filtro sintetico costituito da TNT del peso di 500 g/mq .


La configurazione della gettata di massi da collocare deve avere da letteratura uno spessore di $S = \sim 3Dr_{50}$.

Ai fini della determinazione della dimensione dei massi quale valore del Dr_{50} è stato assunto il valore massimo (1.0 m) tra quelli risultanti dalle differenti formule applicate, mentre il valore medio del Dr_{50} risulta pari a $Dr_{50 \text{ medio}} = 72 \text{ cm}$

Ai fini dello spessore dello strato in pietrame di protezione invece si fa riferimento al valore medio assumendo lo spessore dello strato di protezione pari a :

$$S_{\text{protezione}} = 3 * Dr_{50 \text{ medio}} = 2.1 \text{ m.}$$

Si assume dunque $S = 2.5 \text{ m}$

| | | |
|---|---|-----------|
|  | <i>Valutazione di compatibilità idraulica ai sensi della direttiva 2/99 della Autorità di Bacino del fiume Po del ponte ad archi sulla Linea di Cintura sul fiume Reno alla Pk 8+383 della Linea Ferroviaria Bologna-Verona</i> | Redatto: |
| Oggetto: | <i>Relazione idraulica</i> | AP |

7. ALLEGATO 1 – DESCRIZIONE CODICE DI CALCOLO: HEC RAS

Le verifiche idrauliche sono state condotte con un modello numerico monodimensionale per il calcolo dei profili di corrente in moto permanente sviluppato tra il 1996 ed il 2001 dal Centro di Ingegneria Idraulica del Corpo degli Ingegneri dell'Esercito degli Stati Uniti USACE-HEC (United States Army Corps of Engineers – Hydrologic Engineering Center) ed implementato nel programma per elaboratore elettronico HEC-RAS River Analysis System di ampia diffusione e consolidata pratica d'uso. Di tale modello è disponibile un'ampia documentazione nella letteratura scientifica.

7.1 Equazioni di base

Il modello di calcolo HECRAS simula il moto permanente gradualmente variato in canali aperti con contorni fissi, anche in condizione di portata variabile lungo l'alveo e di variazioni del regime di corrente.

Il calcolo di base risolve l'equazione monodimensionale dell'energia; le perdite energetiche sono calcolate tramite l'equazione di Manning e i coefficienti di contrazione ed espansione. Nei casi in cui il profilo della superficie idrica è rapidamente variato, si utilizza l'equazione di conservazione della quantità di moto. Si possono considerare anche gli effetti di eventuali ostruzioni, come i ponti, ed è possibile analizzare anche gli effetti dei potenziali interventi di mitigazione delle piene.

L'equazione base è quella della conservazione dell'energia:

dove, per le due sezioni successive indicate con i pedici 1 e 2:

$$Z_1 + Y_1 + \frac{\alpha V_1^2}{2g} = Z_2 + Y_2 + \frac{\alpha V_2^2}{2g} + H_E$$

Z è la quota del fondo del canale,


Y è il tirante idrico in corrispondenza delle sezioni,

α è un coefficiente che tiene conto della distribuzione non uniforme della velocità dell'acqua,

V è la velocità media dell'acqua,

g è l'accelerazione di gravità,

h_e è la perdita di carico tra le due sezioni 1 e 2.

| | | |
|---|---|-----------|
|  | Valutazione di compatibilità idraulica ai sensi della direttiva 2/99 della Autorità di Bacino del fiume Po del ponte ad archi sulla Linea di Cintura sul fiume Reno alla Pk 8+383 della Linea Ferroviaria Bologna-Verona | Redatto: |
| Oggetto: | Relazione idraulica | AP |

La perdita di carico totale tra due sezioni successive del corso d'acqua viene calcolata come somma delle perdite di carico per attrito lungo il contorno bagnato e delle perdite di carico per espansione o contrazione della corrente. L'equazione che esprime la perdita di carico complessiva assume dunque la forma:

$$h_e = L \overline{S_f} + C \left| \frac{\alpha V_2^2}{2g} - \frac{\alpha V_1^2}{2g} \right|$$

dove:

L è la lunghezza del tronco d'alveo tra le due sezioni, pesata rispetto alla portata,

S_f è la perdita di carico per attrito tra le due sezioni,

C il coefficiente di espansione/contrazione.

La distanza pesata L viene calcolata tramite l'equazione:

$$L = \frac{L_{lob} \overline{Q_{lob}} + L_{ch} \overline{Q_{ch}} + L_{rob} \overline{Q_{rob}}}{\overline{Q_{lob}} + \overline{Q_{ch}} + \overline{Q_{rob}}}$$

dove:

L_{lob} , L_{ch} , L_{rob} sono le lunghezze del tronco d'alveo rappresentative del canale e delle golene sinistra e destra.

Q_{lob} , Q_{ch} , Q_{rob} sono le portate medie transitanti nel canale e nelle due golene sinistra e destra

Il metodo di soluzione adottato da HEC-RAS per l'equazione di continuità dell'energia applicata al moto permanente gradualmente vario richiede l'assunzione che la perdita di carico in una sezione sia la stessa che si avrebbe in moto uniforme a parità di sezione e velocità dell'acqua. HEC-RAS usa la formula del moto uniforme di Manning per valutare le perdite di carico distribuite, ossia la pendenza della linea piezometrica in alveo:

$$S_f = \left(\frac{Q}{K} \right)^2$$


dove K , fattore di trasporto, viene calcolato come:

$$K = \frac{1}{n} A R^{2/3}$$

in cui:

n è il coefficiente di scabrezza di Manning

A è l'area della sezione

| | | |
|---|---|-----------|
|  | <i>Valutazione di compatibilità idraulica ai sensi della direttiva 2/99 della Autorità di Bacino del fiume Po del ponte ad archi sulla Linea di Cintura sul fiume Reno alla Pk 8+383 della Linea Ferroviaria Bologna-Verona</i> | Redatto: |
| Oggetto: | <i>Relazione idraulica</i> | AP |

R è il raggio idraulico della sezione bagnata.

Il sistema delle due equazioni consente la determinazione del profilo idrico della corrente una volta note la geometria e la scabrezza dell'alveo e le condizioni del moto alla sezione dalla quale deve iniziare il calcolo del profilo.

Nel caso di passaggio da regime di corrente veloce a corrente lenta, tramite risalto idraulico, il flusso perde il carattere gradualmente variato e l'equazione dell'energia non può essere applicata. In tal caso, si ricorre all'equazione di conservazione della quantità di moto:

$$\frac{\beta_2 Q_2^2}{g A_2} + A_2 Y_{2,b} + \left(\frac{A_1 + A_2}{2} \right) L \cdot i - \left(\frac{A_1 + A_2}{2} \right) L \cdot J_m - \frac{\beta_1 Q_1^2}{g A_1} - A_1 Y_{1,b} = 0$$

Il calcolo dei tempi della propagazione del fronte è stato effettuato in accordo con il metodo proposto da Hunt (1987) e modificato da Molinaro e Fenaroli (1988) basato essenzialmente sulla teoria del modello cinematico combinata alla teoria delle onde a fronte rapido. Secondo tale metodo i valori di portata immessi a monte si propagano all'interno del corpo dell'onda con celerità $c = dQ/dA$, mentre il fronte avanza con velocità data dall'espressione:


$$v = \frac{(Q - Q_0)}{(A - A_0)}$$

dove Q ed A sono la portata e l'area della sezione bagnata dopo l'arrivo dell'onda, mentre Q_0 e A_0 sono l'area e la sezione bagnata preesistenti.

7.2 Metodo di soluzione numerica

Per la risoluzione dell'equazione di conservazione dell'energia in alvei a sezione variabile HEC-RAS impiega un metodo noto come "standard step method". Secondo tale metodo, il programma procede nel calcolo iterativamente, determinando per approssimazioni successive l'altezza dell'acqua alla successiva sezione di calcolo, sulla base dell'altezza già calcolata alla sezione corrente. In generale la procedura è la seguente:

- la quota dell'acqua e la portata sono note alla sezione di inizio calcolo (sez. 1)
- si calcola l'energia della sezione sulla base dei dati a) e della geometria della sezione
- la geometria della sezione successiva (sez. 2) è nota insieme alla distanza tra le due sezioni
- si assume una quota dell'acqua alla successiva sezione 2 e se ne calcola il raggio idraulico e l'area sulla base della geometria della sezione stessa. Quindi si determina un valore medio della capacità di deflusso delle due sezioni. La capacità di deflusso di una

| | | |
|---|---|----------|
|  | <i>Valutazione di compatibilità idraulica ai sensi della direttiva 2/99 della Autorità di Bacino del fiume Po del ponte ad archi sulla Linea di Cintura sul fiume Reno alla Pk 8+383 della Linea Ferroviaria Bologna-Verona</i> | Redatto: |
| Oggetto: | <i>Relazione idraulica</i> | AP |

sezione di un alveo è, per una determinata altezza d'acqua, la portata che può transitare nell'alveo con una pendenza piezometrica unitaria

- e) si calcola la perdita di carico ripartita sulla base del valore medio della capacità di deflusso, della lunghezza del tratto e della portata
- f) si calcola il carico cinetico pesato, $\alpha V^2/2g$, nella seconda sezione.
- g) si calcolano le ulteriori perdite di carico dovute alla contrazione ed all'allargamento della sezione sulla base di quanto determinato in f)
- h) si calcola la variazione della quota dell'acqua tra le due sezioni, come variazione della somma del carico cinetico e delle perdite di carico
- i) si calcola la quota dell'acqua nella seconda sezione come somma del primo livello idrico e delle variazioni di quota calcolata in h)
- j) si calcola l'errore tra il livello d'acqua nella sezione 2 assunto in d) e quello calcolato in i)
- k) se l'errore è minore di 1 cm la procedura è ripetuta per le sezioni successive dell'alveo, altrimenti è ripetuta per le stesse due sezioni ma con una nuova stima iniziale dell'altezza d'acqua nella sezione 2 (punto d).


7.3 Approssimazioni del calcolo

Le principali ipotesi su cui si basa il modello matematico utilizzato si possono sintetizzare nella condizione che l'onda di piena possa essere assimilata ad una corrente a pelo libero di tipo unidimensionale.

Questa assunzione non si discosta molto dal vero se l'alveo ha un andamento regolare, con curve non troppo brusche e con le sezioni trasversali che variano gradualmente nel senso della corrente, tuttavia nella pratica è possibile che la topografia delle valli non soddisfi queste condizioni.

Per tale motivo, come sovente accade in Idraulica, la schematizzazione adottata non consente di spiegare ogni singolarità del fenomeno, ma permette di descrivere in modo soddisfacente l'andamento globale o medio. Nel caso dell'onda di piena, ciò si traduce in una descrizione della corrente media, in quanto ogni grandezza viene considerata costante su tutta la sezione trasversale.

Sotto queste condizioni l'onda di piena viene inclusa nella categoria delle correnti lineari o gradualmente variate e descritta tramite le equazioni esposte. La soluzione fornita è pertanto affetta da approssimazioni in tutte quelle situazioni in cui l'onda reale assume caratteristiche

| | | |
|---|---|----------|
|  | <i>Valutazione di compatibilità idraulica ai sensi della direttiva 2/99 della Autorità di Bacino del fiume Po del ponte ad archi sulla Linea di Cintura sul fiume Reno alla Pk 8+383 della Linea Ferroviaria Bologna-Verona</i> | Redatto: |
| Oggetto: | <i>Relazione idraulica</i> | AP |

diverse dalla condizione di corrente a pelo libero di tipo lineare fino a divenire spiccatamente bidimensionali.

La presenza, infatti, di una curva molto stretta della valle o di una rapida apertura di una piana di espansione molto ampia producono variazioni delle caratteristiche della corrente, quali velocità e livello del pelo libero, non solo nella direzione longitudinale dell'asse, ma anche nella direzione ad esso perpendicolare.

Un'attenta ubicazione delle sezioni trasversali della valle ed una loro accurata descrizione in termini di canale, golene ed aree di solo invaso può ridurre l'approssimazione nel caso delle piane di esondazione, mentre per le curve molto brusche, qualora necessario, la sopraelevazione in curva del pelo libero può essere stimata utilizzando metodi empirici.

Un'altra approssimazione importante del modello deriva dalla formula di Manning, con la quale vengono calcolate le perdite di carico distribuite, ed in particolare dai valori attribuiti al coefficiente di scabrezza n . Quando sia possibile una buona stima di questo coefficiente il modello matematico è in grado di calcolare la propagazione di un'onda di piena con una approssimazione accettabile ai fini pratici. In assenza di conoscenze dettagliate delle caratteristiche fisiche delle sezioni ed in considerazioni del basso valore di portata esaminato, risulta opportuna l'adozione di valori comunque cautelativi.

Ultima e forse più importante approssimazione del calcolo indotta dal modello adottato è connessa all'ipotesi che l'alveo si mantenga a fondo fisso durante la propagazione della piena, senza risentire dell'azione modellatrice della corrente. Nella realtà, il passaggio di una piena sia naturale che artificiale altera inevitabilmente la morfologia della valle; tuttavia i mutamenti risultano assolutamente imprevedibili.

7.4 Coefficiente di scabrezza

Il coefficiente di scabrezza in un alveo naturale rappresenta una misura globale della resistenza al moto della corrente, in cui si compendiano una molteplicità di fattori tra i quali la forma e la regolarità della sezione, la presenza quali-quantitativa di vegetazione e le caratteristiche litologiche del materiale d'alveo.

La sua determinazione deve quindi essere condotta con grande attenzione, valutando attentamente le caratteristiche specifiche dei materiali che compongono l'alveo e la copertura vegetale delle sponde e delle aree golenali adiacenti interessate al deflusso lungo tutto lo sviluppo dell'asta fluviale di interesse.

Nella pratica tecnica il valore numerico del coefficiente rappresentativo del termine di resistenza nell'equazione del moto può essere determinato facendo ricorso a relazioni e


| | | |
|---|---|-----------|
|  | Valutazione di compatibilità idraulica ai sensi della direttiva 2/99 della Autorità di Bacino del fiume Po del ponte ad archi sulla Linea di Cintura sul fiume Reno alla Pk 8+383 della Linea Ferroviaria Bologna-Verona | Redatto: |
| Oggetto: | Relazione idraulica | AP |

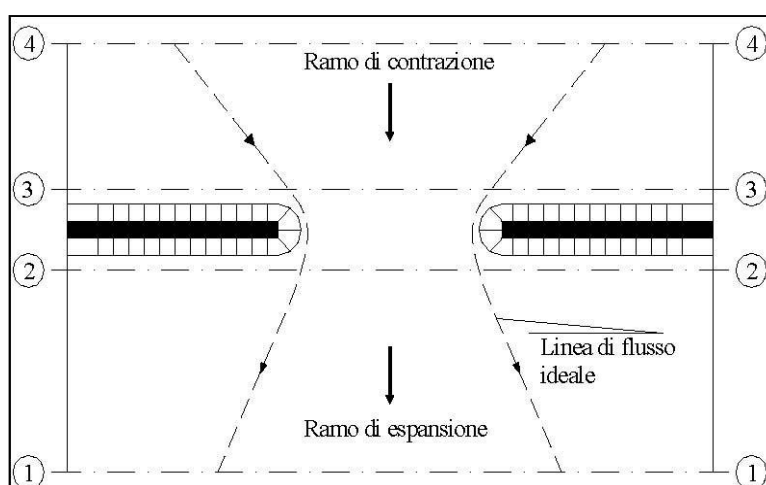
tabelle di natura sperimentale ampiamente disponibili in letteratura tecnica. Tali relazioni forniscono il valore del coefficiente di scabrezza sulla base di analogie delle caratteristiche morfologiche e vegetazionali dell'alveo di interesse ad una serie di situazioni tipiche dei corsi d'acqua naturali già investigate sperimentalmente.

7.5 Ponti

La presenza di una singolarità geometrica in un corso d'acqua, come nel nostro caso la presenza di un ponte, comporta nella corrente del corso d'acqua modifiche significative che non possono essere trascurate.

Analizzeremo i corsi d'acqua principali con il programma Hec-Ras che utilizza, come nel nostro caso di bruschi restringimenti, confluenze, rapide variazioni di pendenza, la soluzione dell'equazione della quantità di moto, in quanto in questi casi non risulta valida l'equazione della conservazione dell'energia.


L'analisi della perdita di energia dovuta alla contrazione della corrente per la presenza di ponti viene effettuata per tre specifiche aree:



- la prima consiste nel valutare le perdite nella zona di valle, dove si ha il fenomeno di espansione della corrente;
- la seconda consiste nel valutare le perdite dovute alla struttura;
- la terza consiste nel valutare le perdite nel tratto immediatamente a monte della struttura, a causa della contrazione.

Occorre, al fine di una giusta determinazione delle perdite di carico a monte e a valle della struttura, imporre le giuste lunghezze nelle quali avviene la contrazione ed espansione.

Dal manuale del programma, si evince che tali distanze siano rispettivamente:

| | | |
|---|---|-----------|
|  | <i>Valutazione di compatibilità idraulica ai sensi della direttiva 2/99 della Autorità di Bacino del fiume Po del ponte ad archi sulla Linea di Cintura sul fiume Reno alla Pk 8+383 della Linea Ferroviaria Bologna-Verona</i> | Redatto: |
| Oggetto: | <i>Relazione idraulica</i> | AP |

$$- L_e = \text{coefficiente} \cdot \frac{(L_{A-B} - L_{C-D})}{2}$$

Dove:

- “coefficiente” è funzione della pendenza media, del rapporto tra i coefficienti di scabrezza delle golene e dell'alveo in magra e del rapporto di costrizione b/B.

- Lc è pari alla lunghezza media della ostruzione delle spalle del ponte.

Il programma permette di analizzare con differenti metodi il profilo idraulico causato dall'interferenza con i ponti.

FLUSSO LIBERO

Il flusso libero si ha quando il corso d'acqua si comporta come un canale a cielo aperto, passando tra le aperture di un ponte. In questo caso viene valutato il momento nella sezione di controllo con l'altezza critica e viene confrontato con il momento della sezione di valle se il flusso è subcritico, ovviamente di monte se il flusso è supercritico.

- Se il momento di valle è maggiore del momento critico nella sezione del ponte, la classe del flusso è considerata completamente subcritico.
- Se il momento di valle è inferiore al momento critico della sezione di controllo si ha che la costrizione determinata dal ponte determina il passaggio della corrente attraverso l'altezza critica, determinando il risalto idraulico.
- Nella terza ipotesi, il profilo è tutto supercritico.

a) Flusso completamente subcritico

In questo caso, ci sono quattro metodi disponibili per valutare le perdite nell'attraversamento del ponte:


- Il metodo dell'energia;
- La conservazione della quantità di moto;
- Equazione di Yarnell;
- Il metodo del Federal Highway Administration (WSPRO).

b) Flusso con risalto

Per i profili subcritici viene applicata l'equazione della conservazione della quantità di moto valutata tra le sezioni di monte e valle del ponte.

c) Flusso completamente supercritico

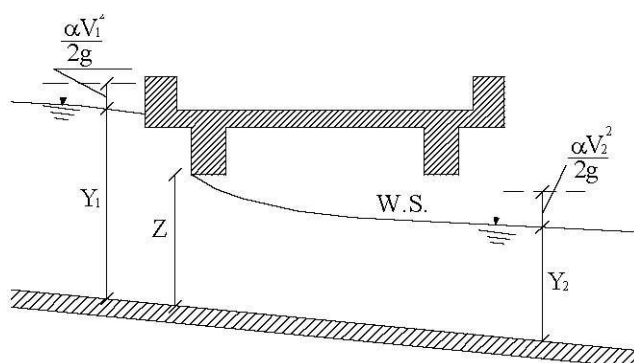
In questo caso i codici di calcolo sono tutti quelli utilizzati nei due casi precedenti.

| | | |
|---|---|-----------|
|  | Valutazione di compatibilità idraulica ai sensi della direttiva 2/99 della Autorità di Bacino del fiume Po del ponte ad archi sulla Linea di Cintura sul fiume Reno alla Pk 8+383 della Linea Ferroviaria Bologna-Verona | Redatto: |
| Oggetto: | Relazione idraulica | AP |

FLUSSO IN PRESSIONE

Quando la corrente entra direttamente a contatto con la parte inferiore del ponte possiamo avere due modi di schematizzare il comportamento idraulico della corrente.

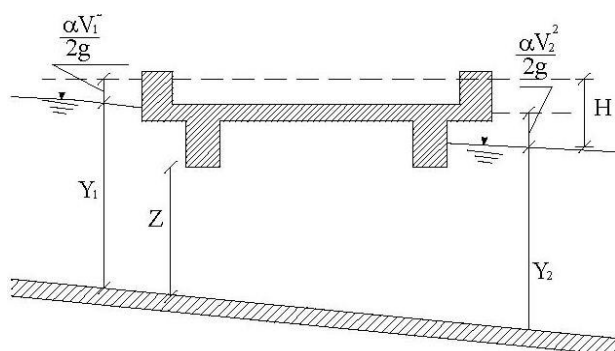
Il primo è quello di considerare la corrente in pressione nell'attraversamento del ponte, la seconda è quello di considerare l'apertura del ponte come un orifizio dove la portata è condizionata dal battente idraulico di monte.



PONTE CON CORRENTE INIZIALMENTE IN PRESSIONE

Viene regolato dalla seguente espressione

$$Q = C_d \cdot A \cdot \left[2g \left(\frac{Y_1 - Z}{2} + \frac{\alpha V_2^2}{2g} \right) \right]$$

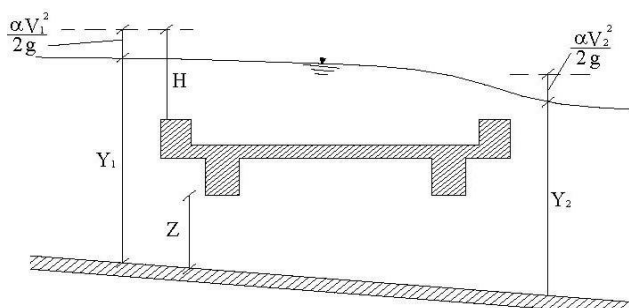


PONTE CON CORRENTE COMPLETAMENTE IN PRESSIONE

Viene regolato dalla seguente espressione

$$Q = CA\sqrt{2gh}$$


con C (coefficiente di portata con flusso in pressione)



PONTE CON CORRENTE CHE SCAVALCA L'IMPALCATO

Viene regolato dalla seguente espressione

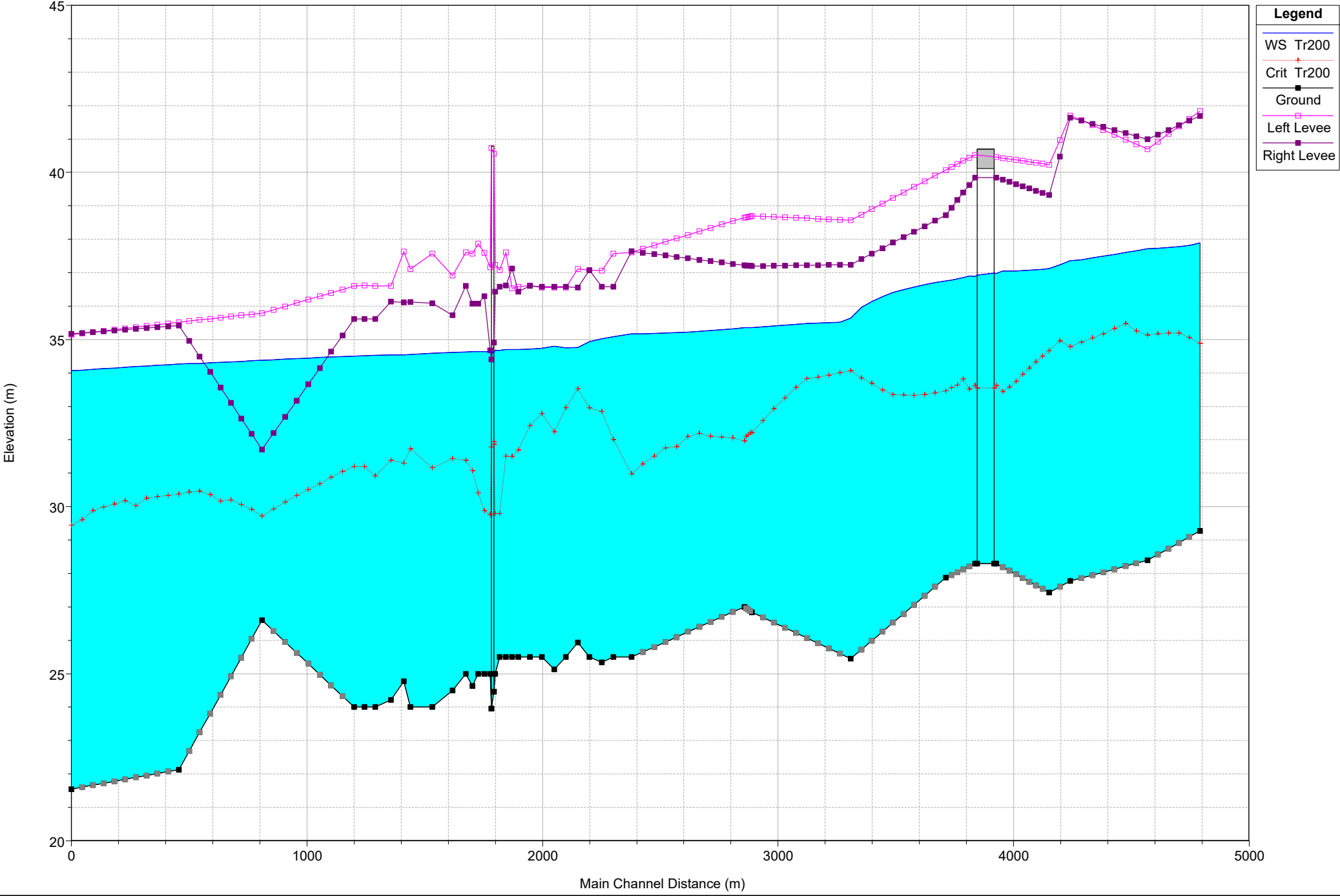
$$Q = CLH^{\frac{3}{2}}$$

| | | |
|---|---|----------|
|  | <i>Valutazione di compatibilità idraulica ai sensi della direttiva 2/99 della Autorità di Bacino del fiume Po del ponte ad archi sulla Linea di Cintura sul fiume Reno alla Pk 8+383 della Linea Ferroviaria Bologna-Verona</i> | Redatto: |
| Oggetto: | <i>Relazione idraulica</i> | AP |

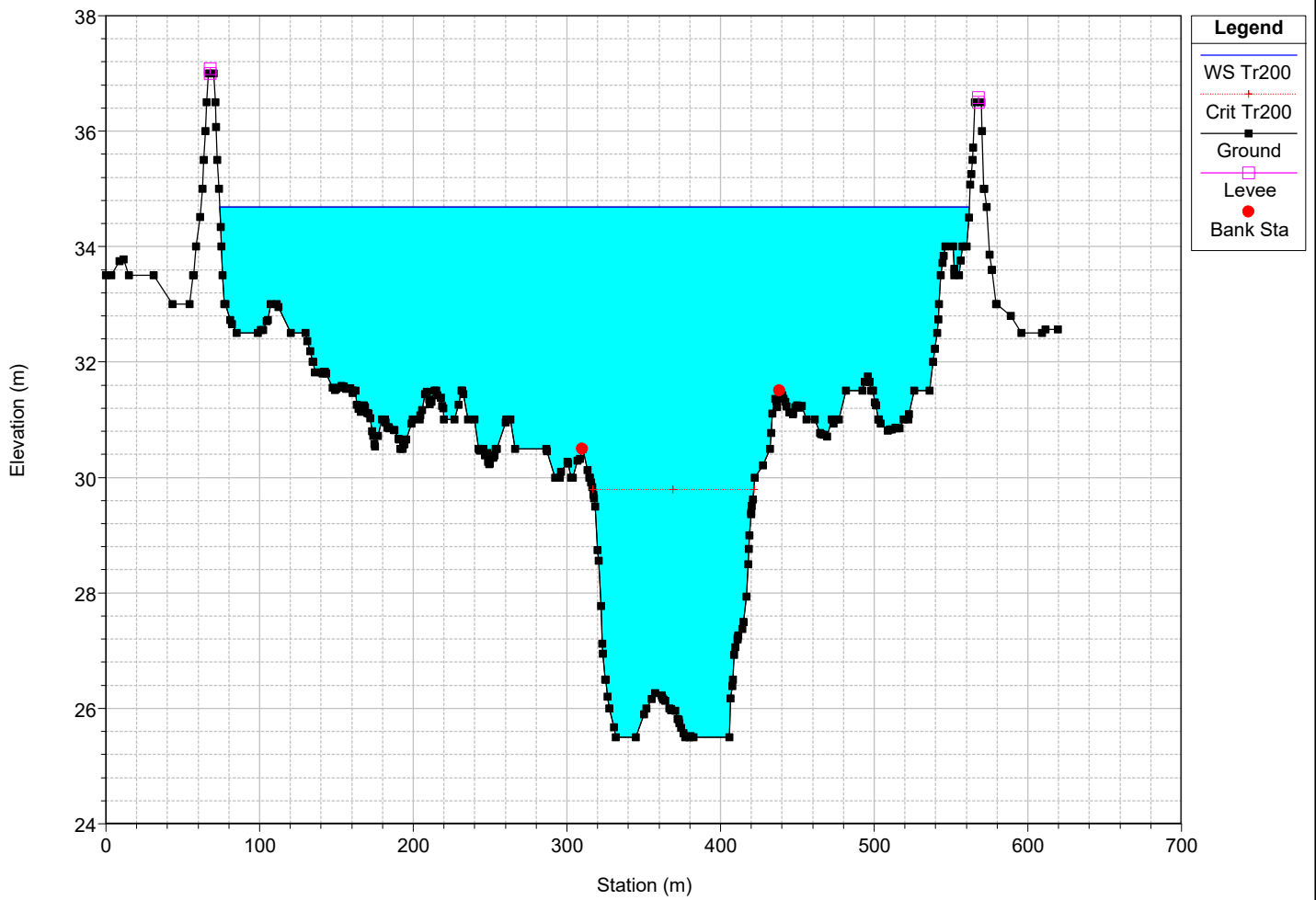
8. ALLEGATO 2 – RISULTATI DEL MODELLO DI CALCOLO

Di seguito verranno illustrati i risultati della modellazione nelle sezioni più significative, per i Tempi di ritorno di 200 anni, livelli di guardia e livelli di sicurezza sia per lo stato Ante Operam che per quello Post Operam.

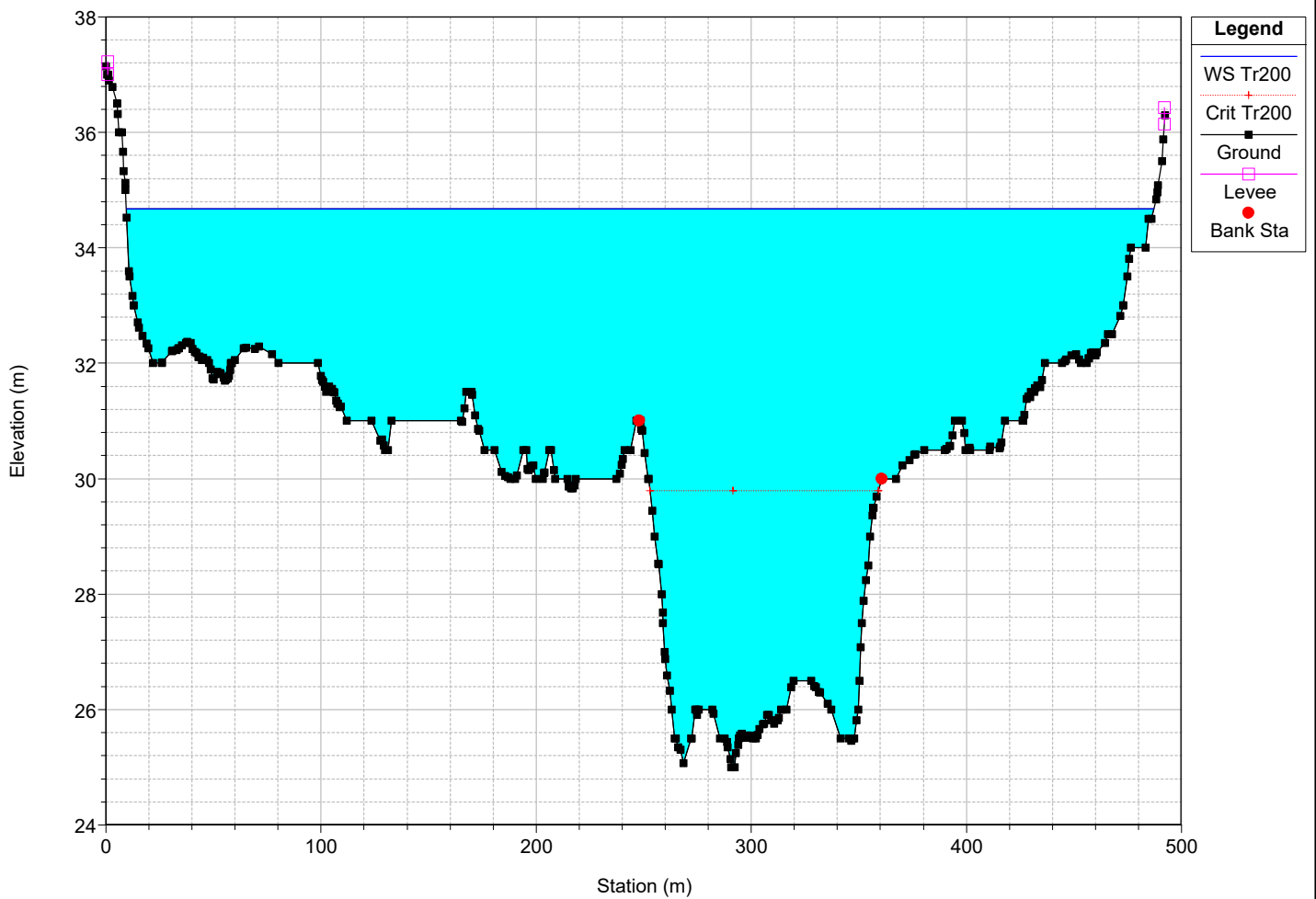
Livello Tr 200 anni ANTE OPERAM - Q = 2232 mc/s



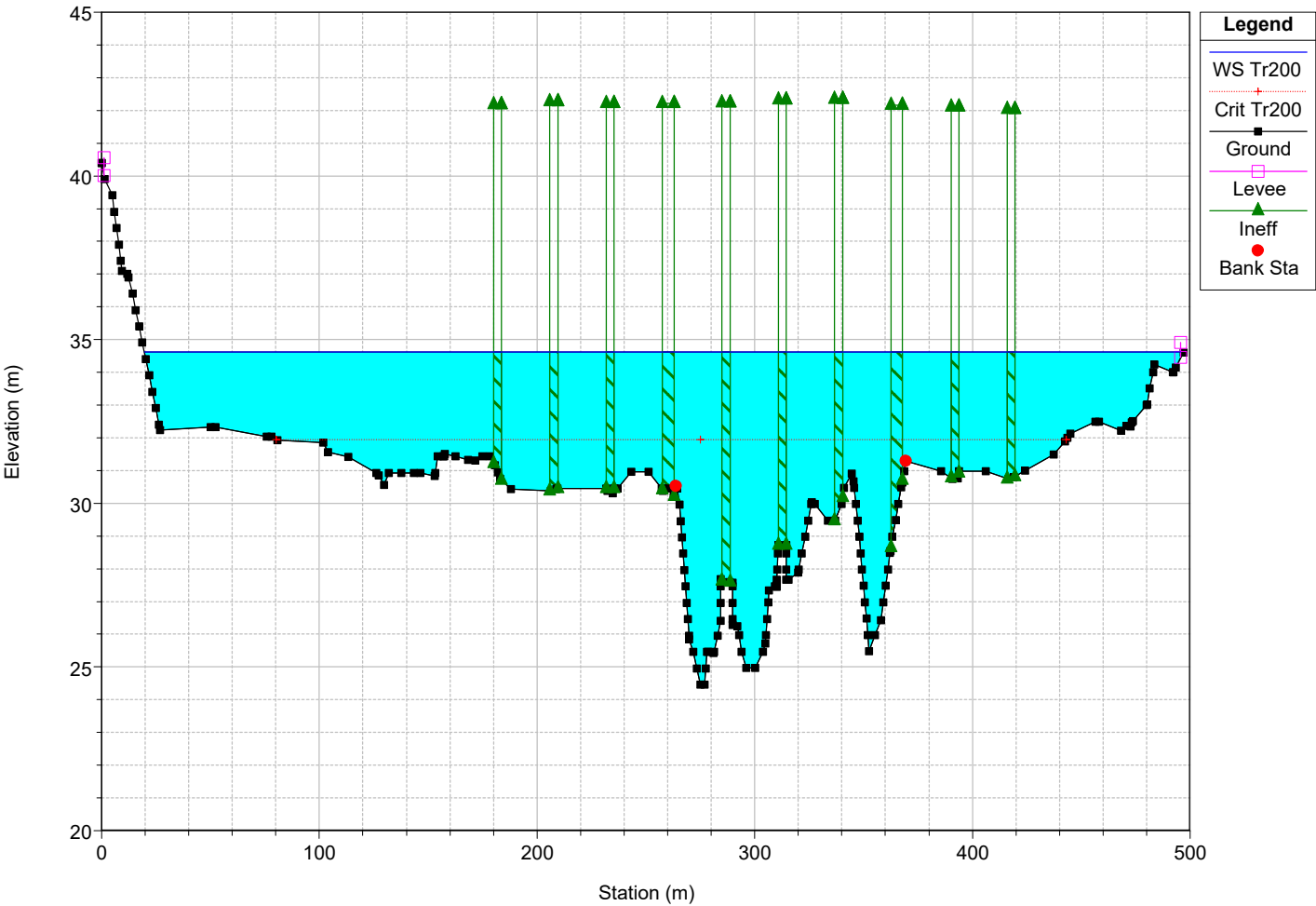
RS = 27 Livello Tr 200 anni ANTE OPERAM - Q = 2232 mc/s



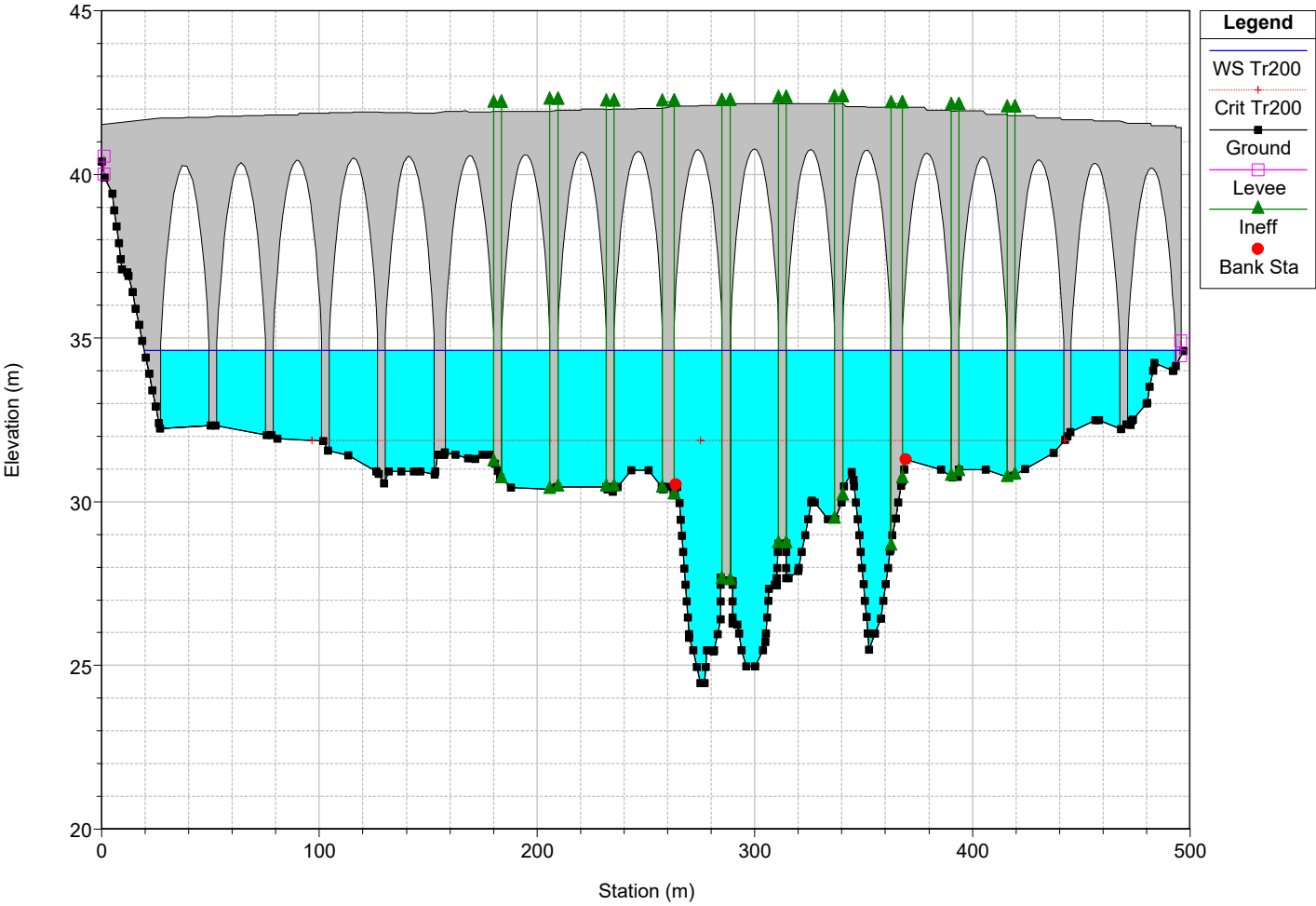
RS = 26 Livello Tr 200 anni ANTE OPERAM - Q = 2232 mc/s



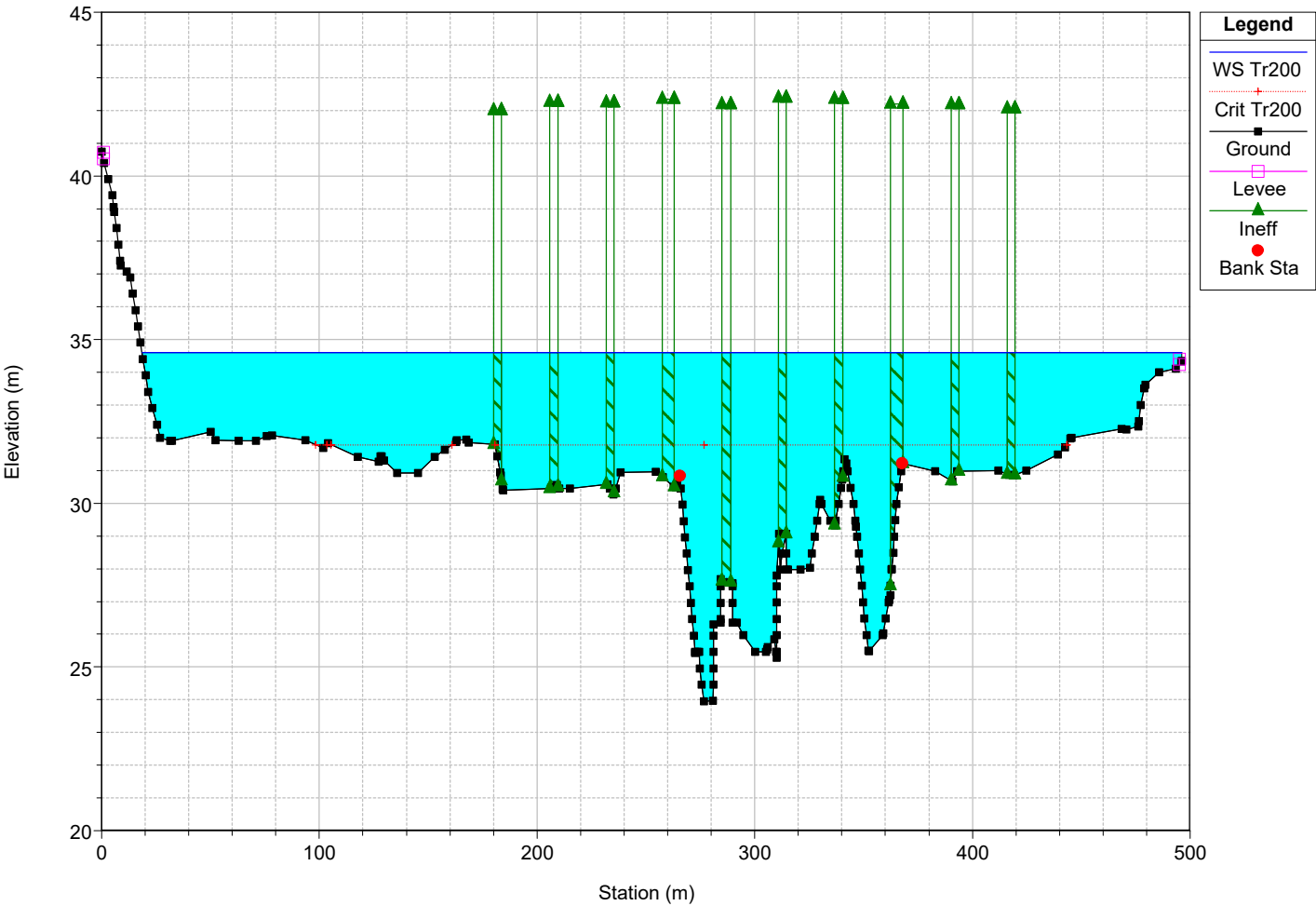
RS = 25 Livello Tr 200 anni ANTE OPERAM - Q = 2232 mc/s



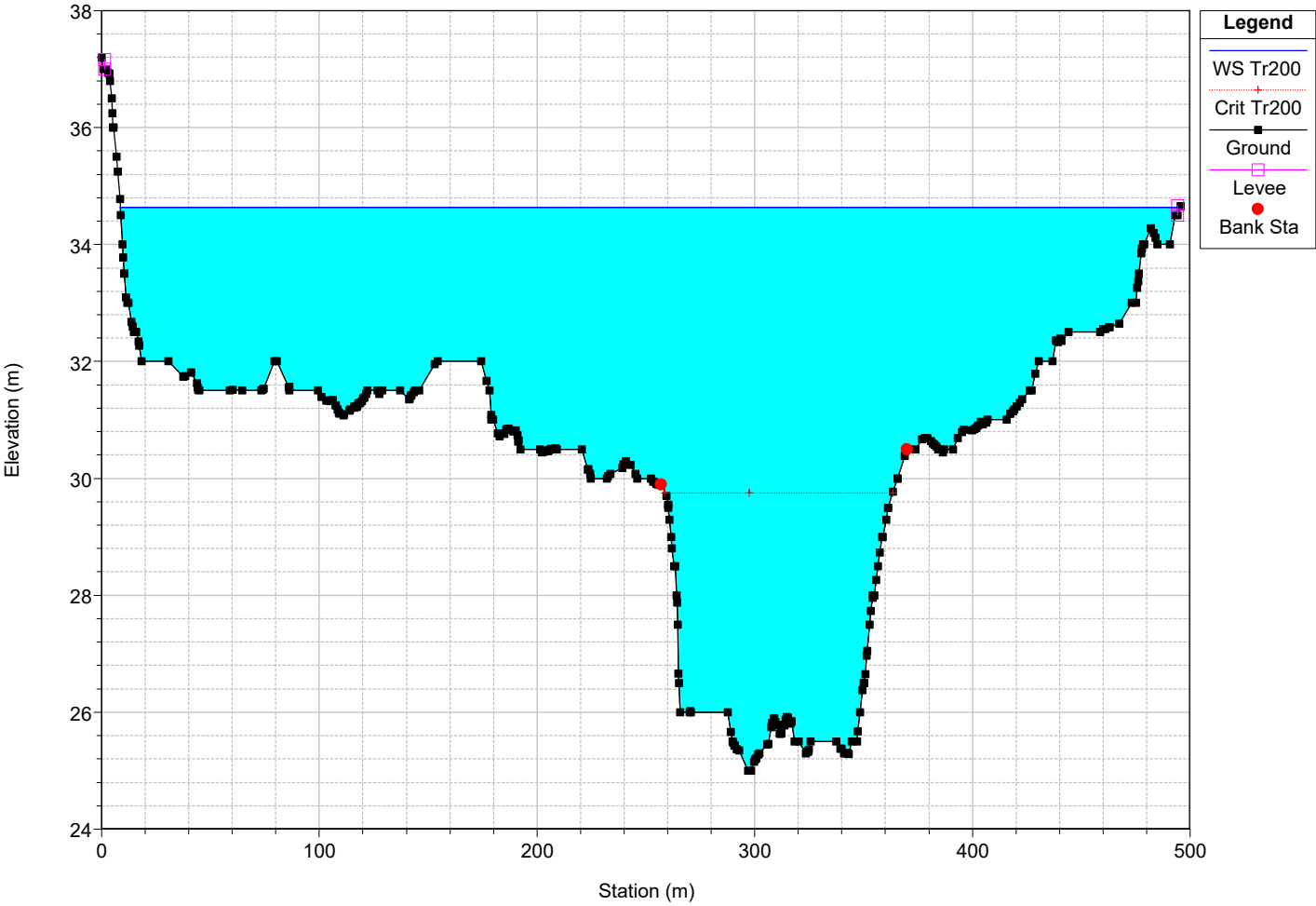
RS = 24.5 BR Livello Tr 200 anni ANTE OPERAM - Q = 2232 mc/s



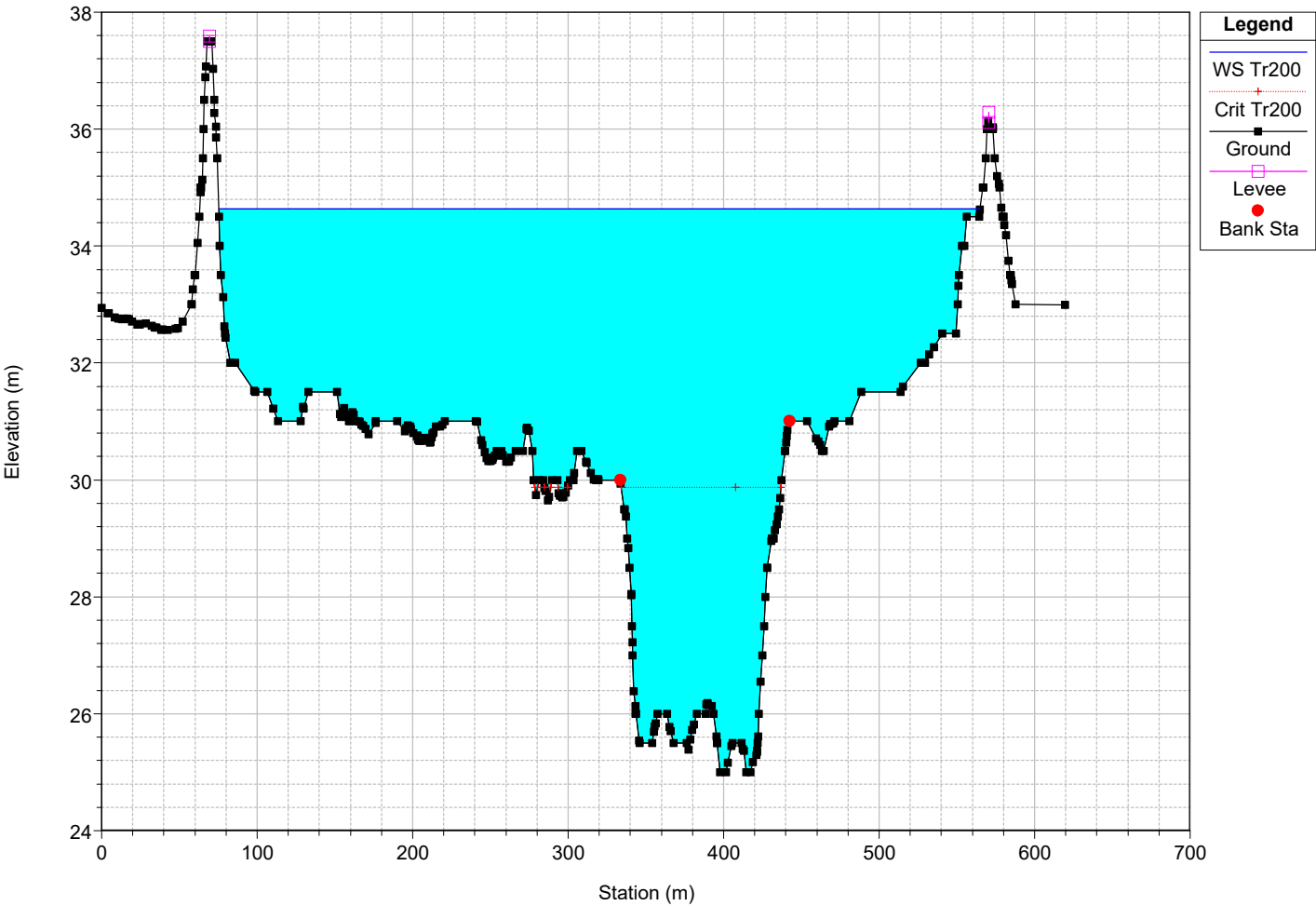
RS = 24 Livello Tr 200 anni ANTE OPERAM - Q = 2232 mc/s



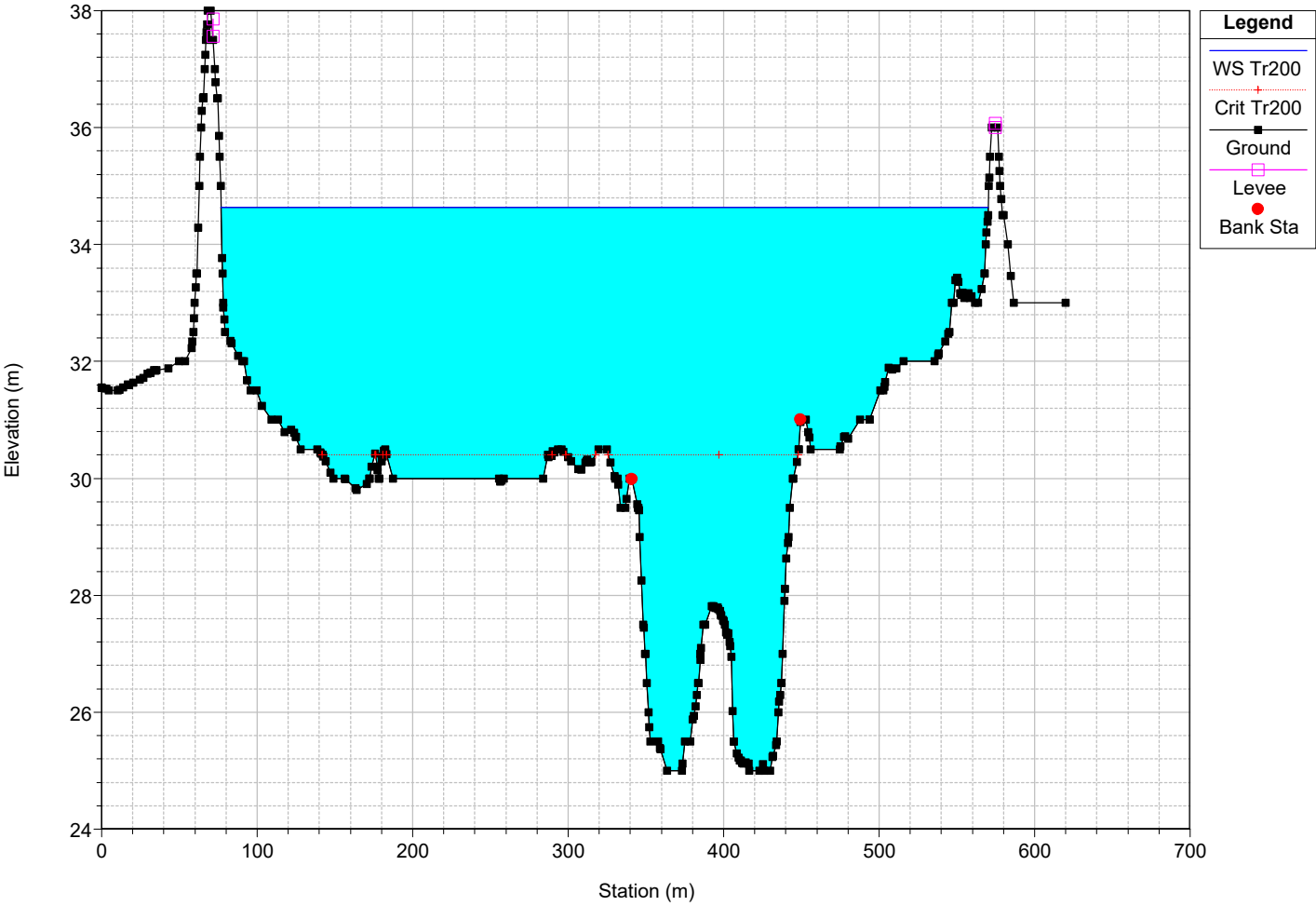
RS = 23 Livello Tr 200 anni ANTE OPERAM - Q = 2232 mc/s



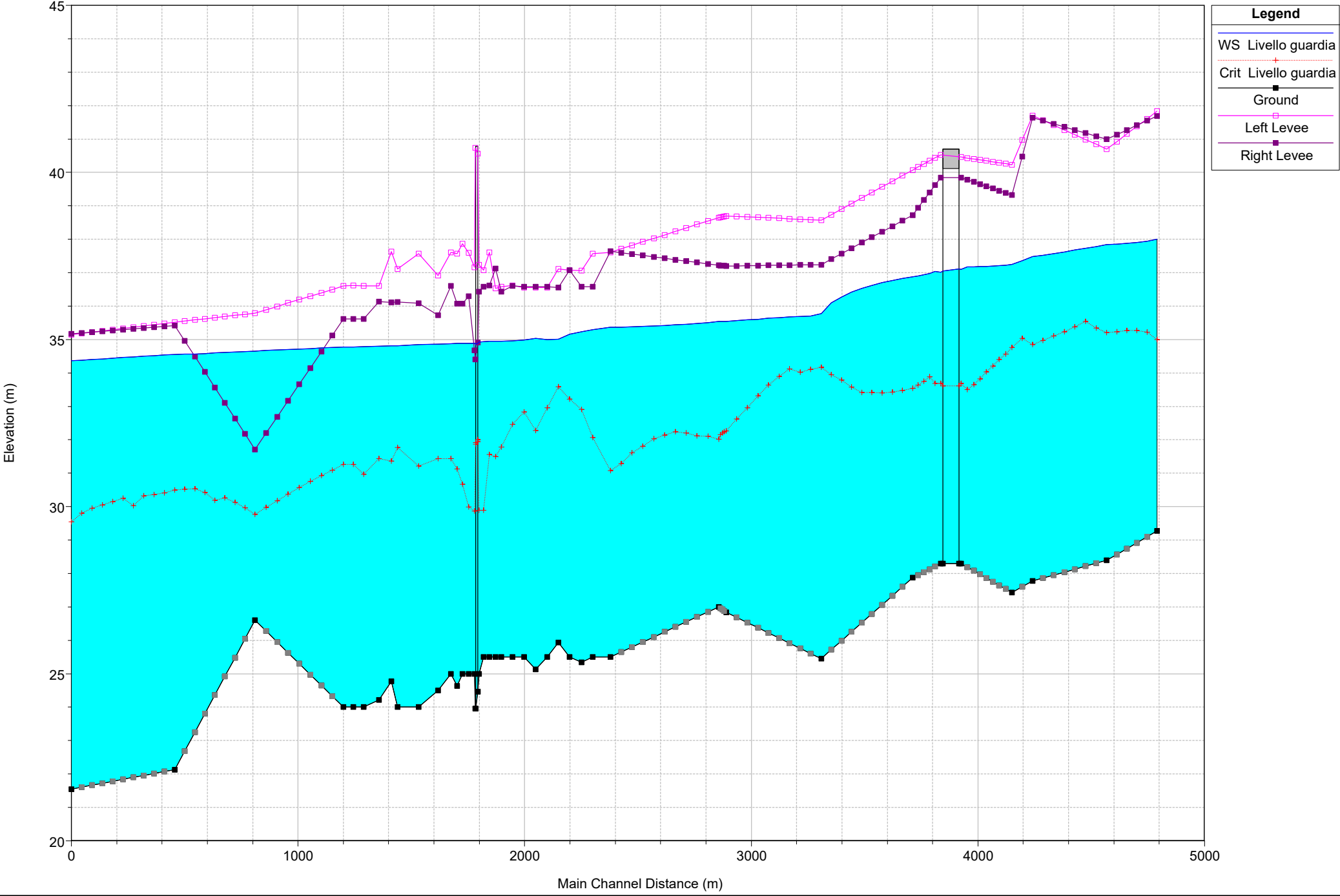
RS = 22 Livello Tr 200 anni ANTE OPERAM - Q = 2232 mc/s



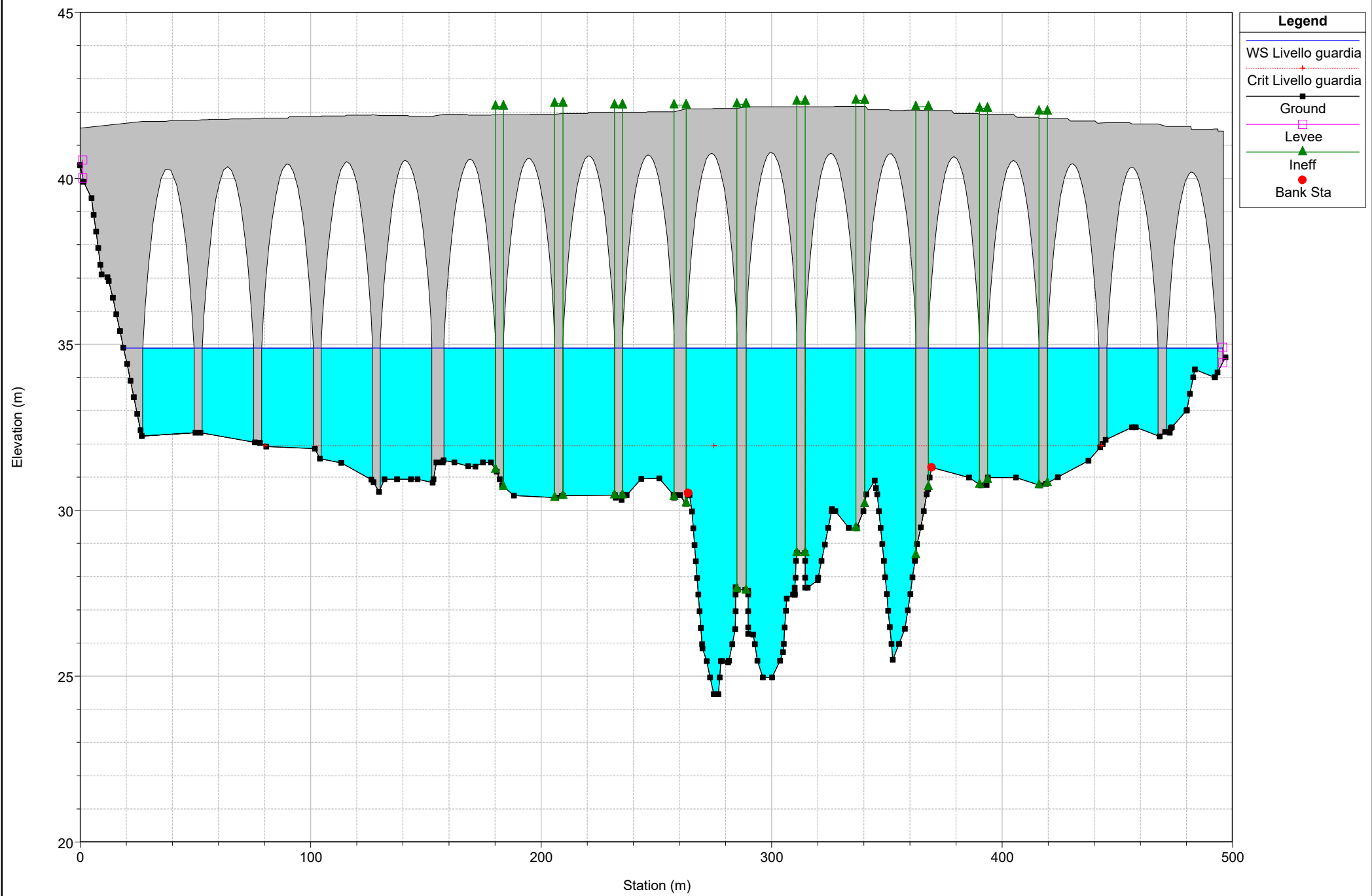
RS = 21 Livello Tr 200 anni ANTE OPERAM - Q = 2232 mc/s



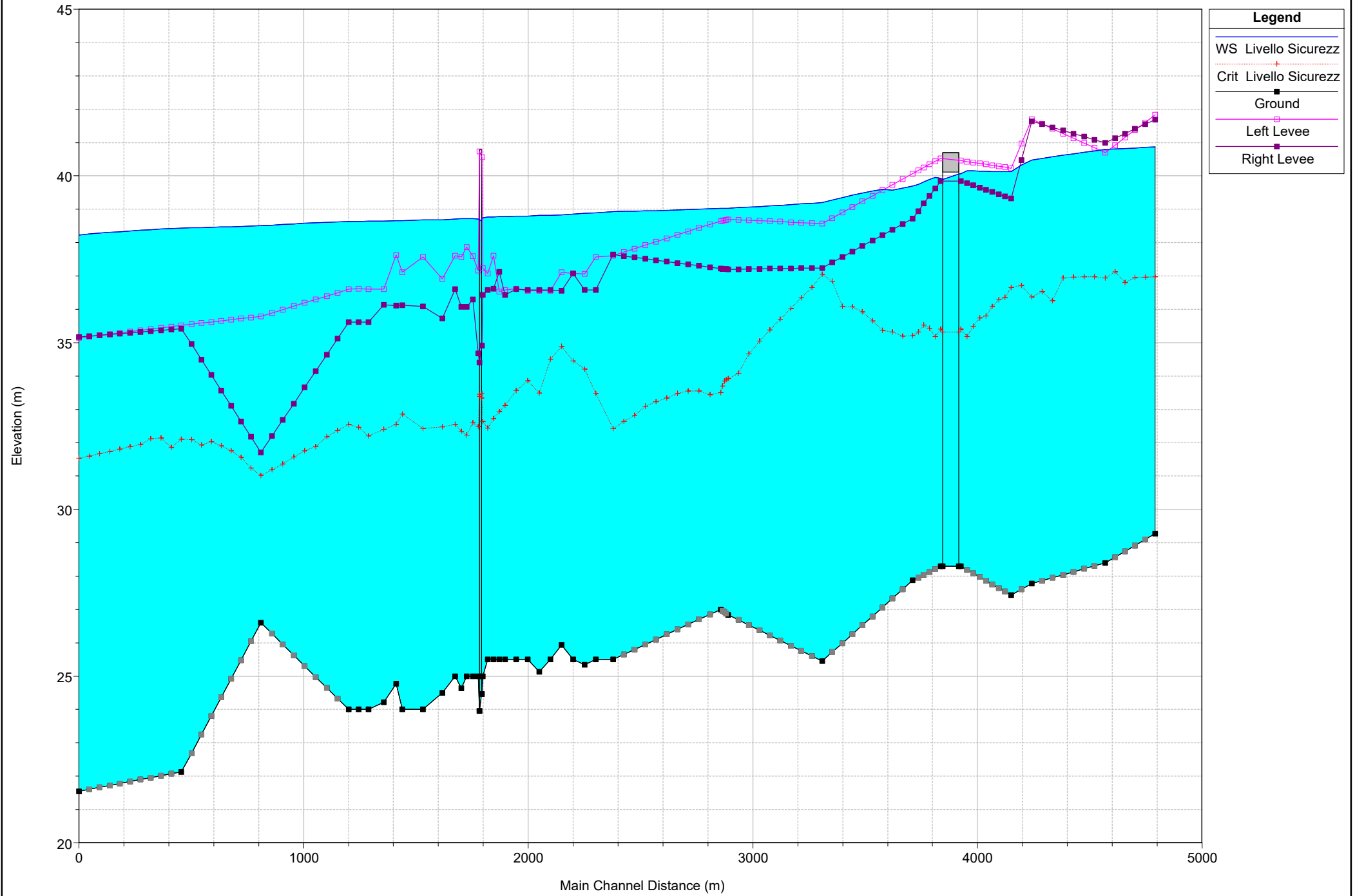
Livello guardia ANTE OPERAM - Q = 2300 mc/s



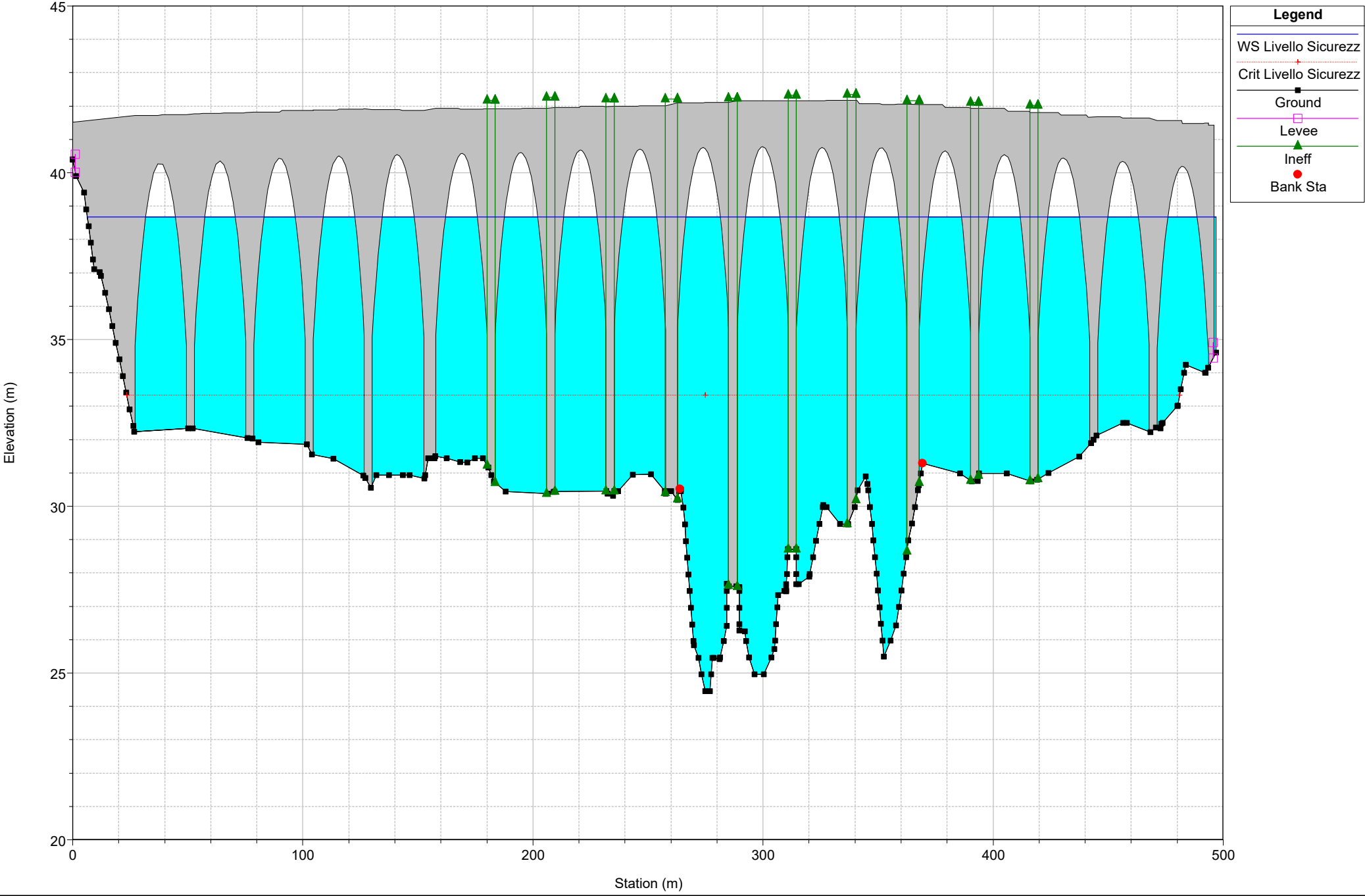
RS = 24.5 BR Livello guardia ANTE OPERAM - Q = 2300 mc/s



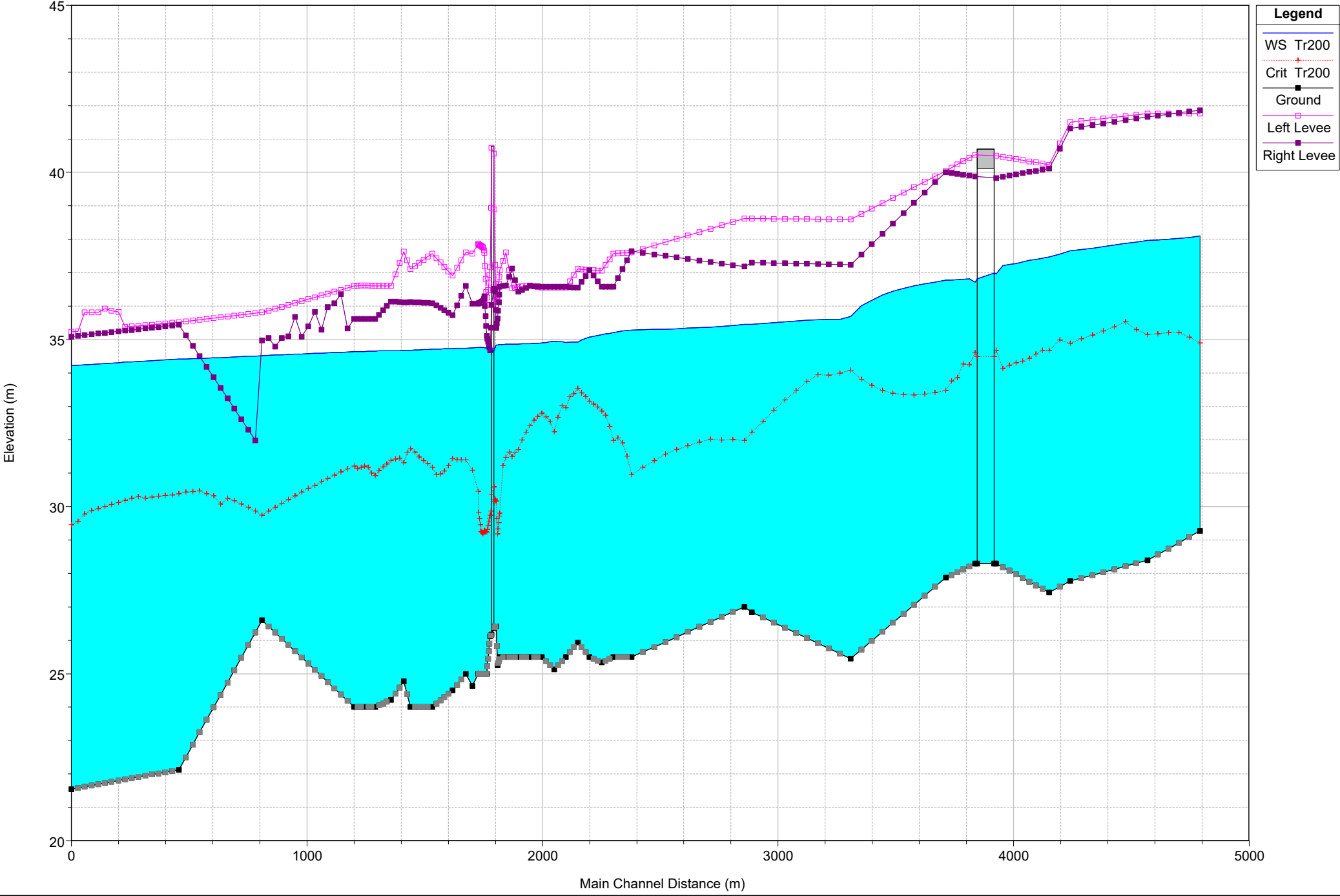
Livello sicurezza ANTE OPERAM - Q = 4800 mc/s



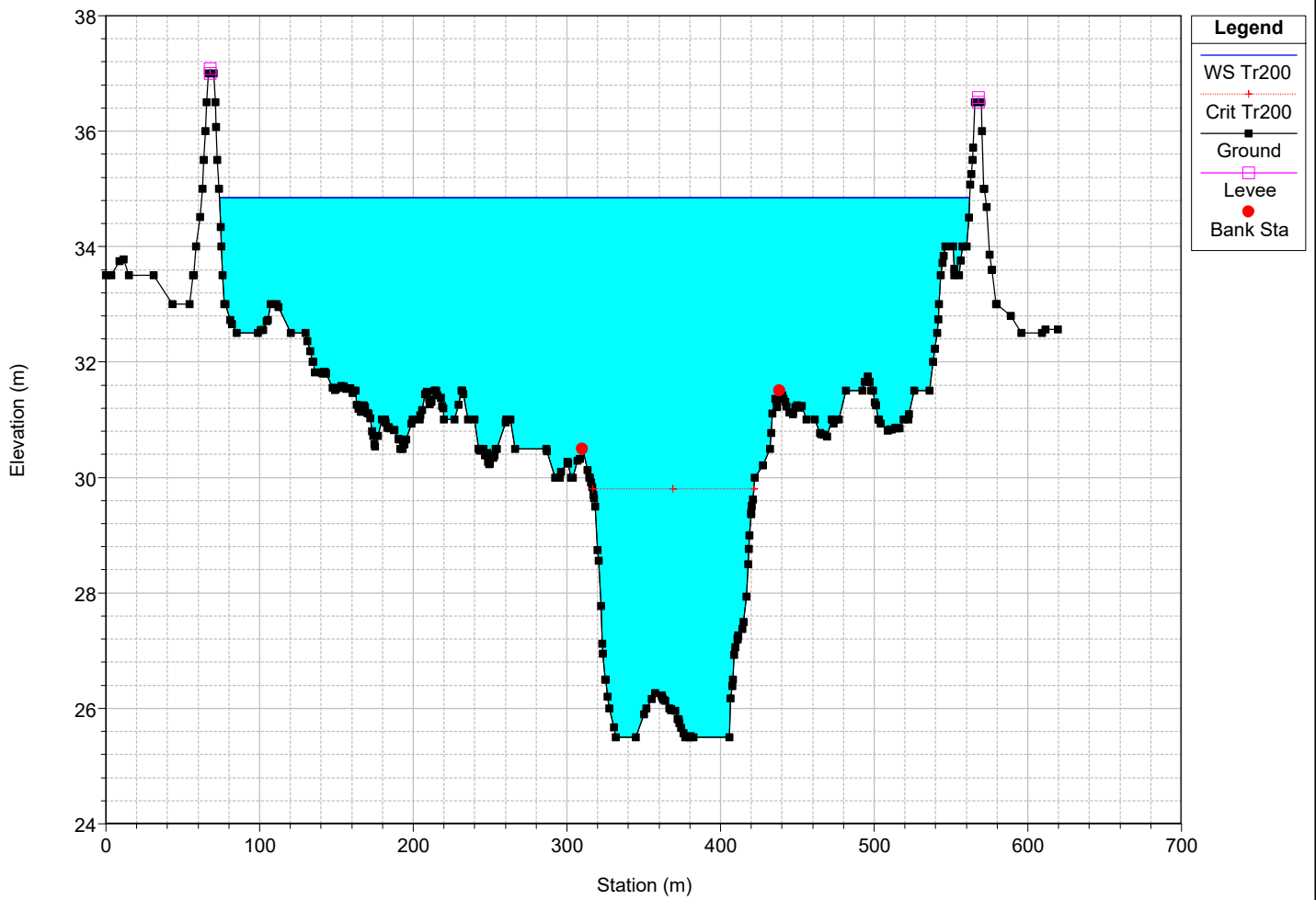
RS = 24.5 BR Livello sicurezza ANTE OPERAM - Q = 4800 mc/s



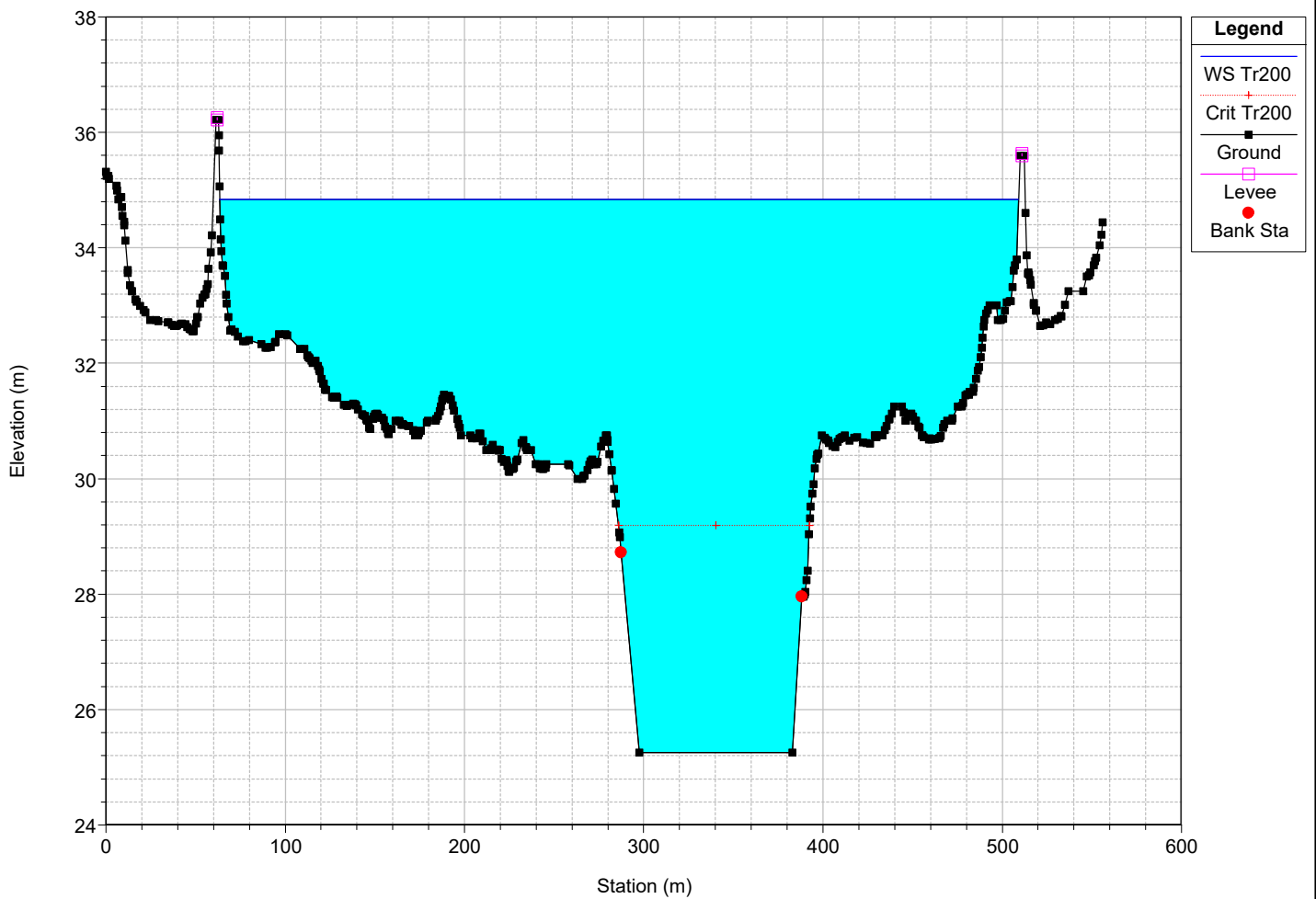
Livello Tr 200 anni POST OPERAM - Q = 2232 mc/s



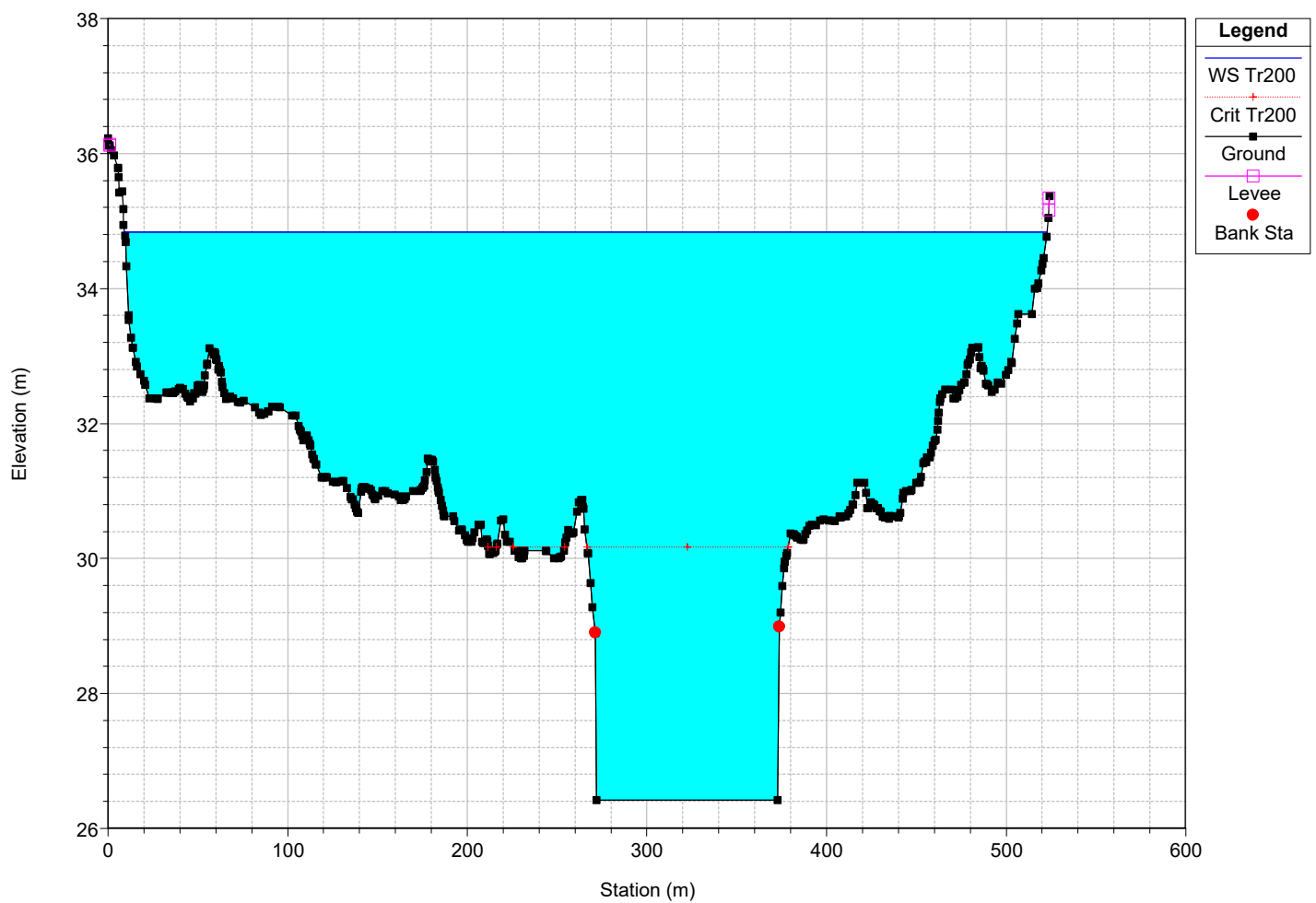
RS = 27 Livello Tr 200 anni POST OPERAM - Q = 2232 mc/s



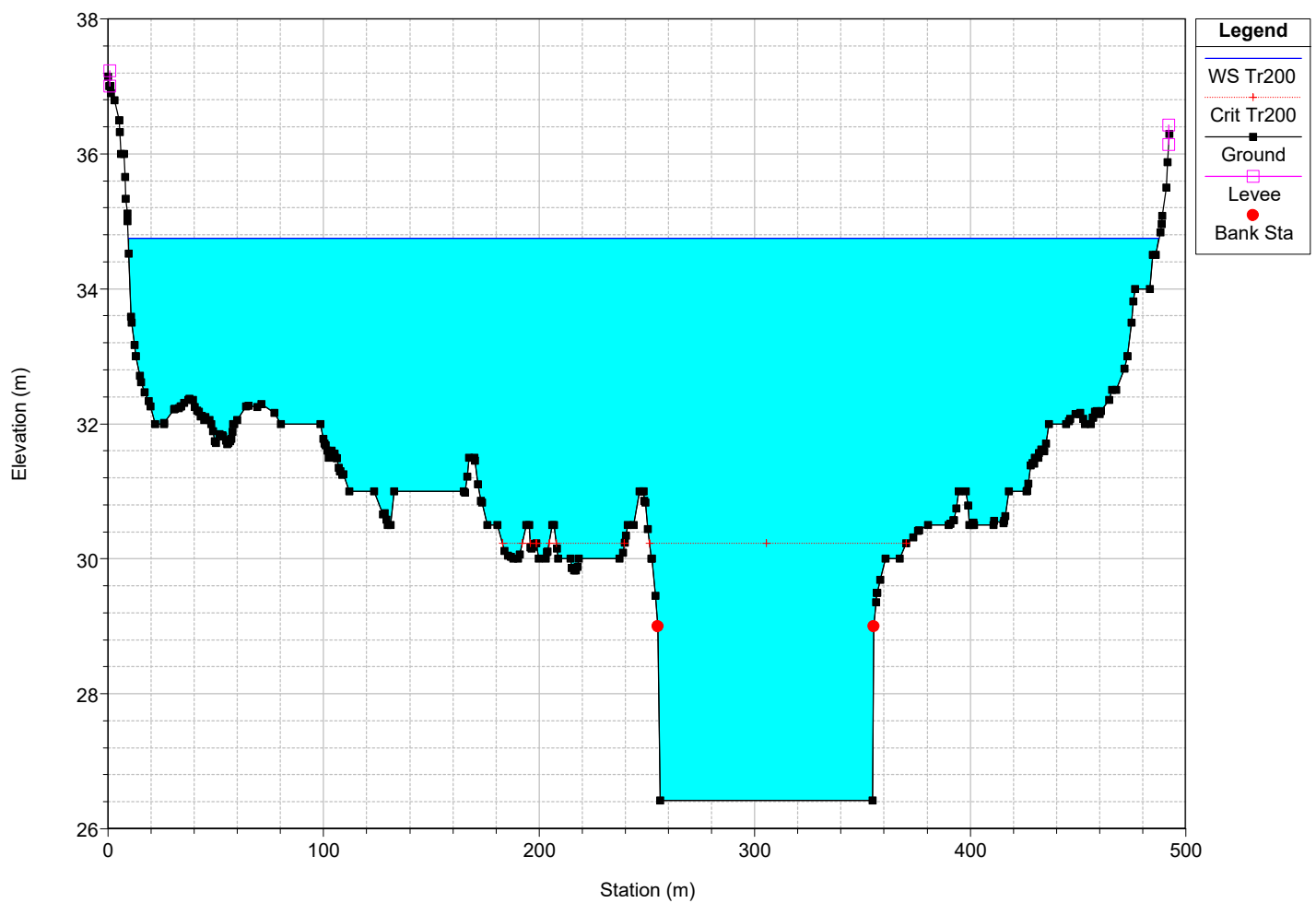
RS = 26.6 Livello Tr 200 anni POST OPERAM - Q = 2232 mc/s



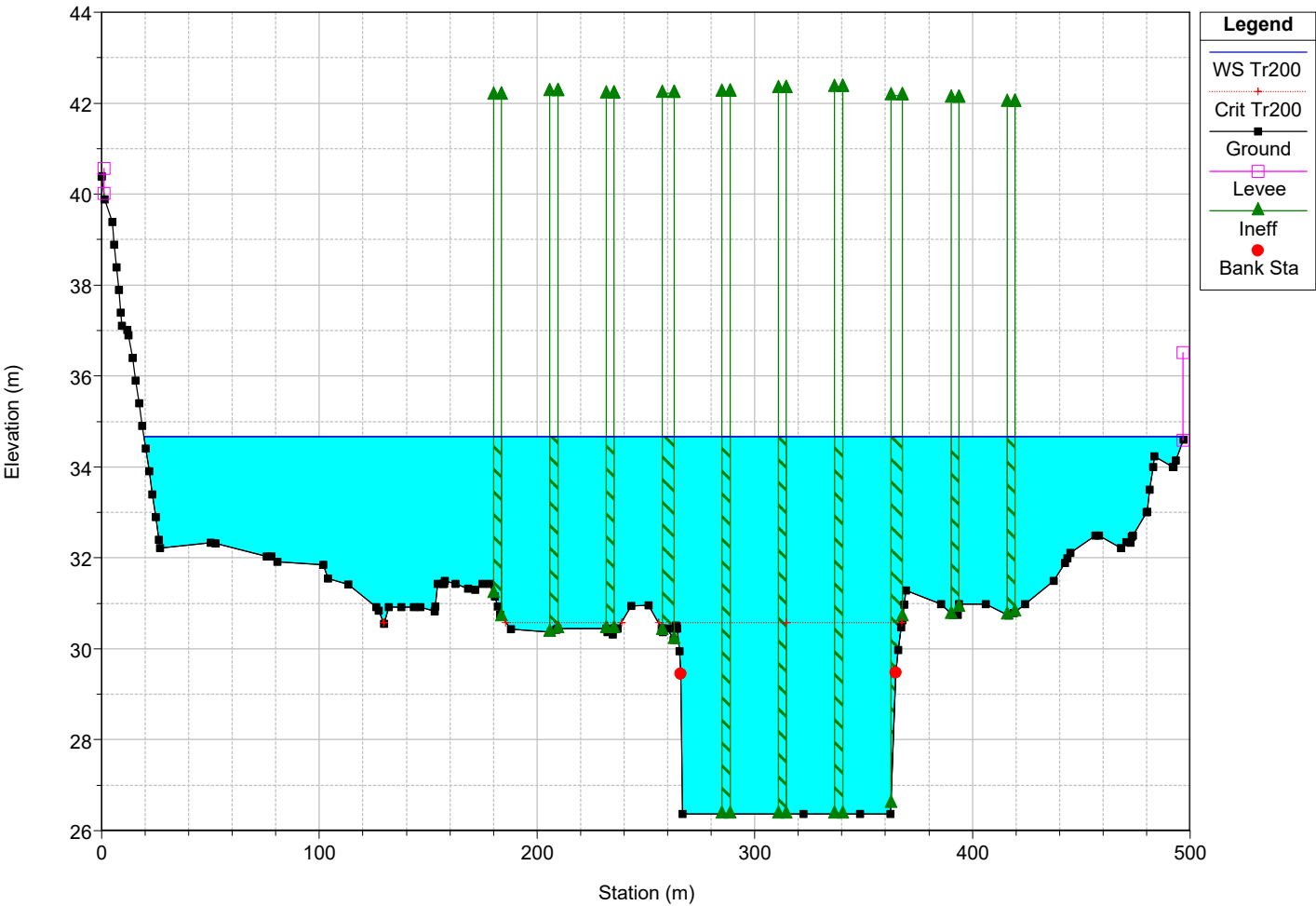
RS = 26.4 Livello Tr 200 anni POST OPERAM - Q = 2232 mc/s



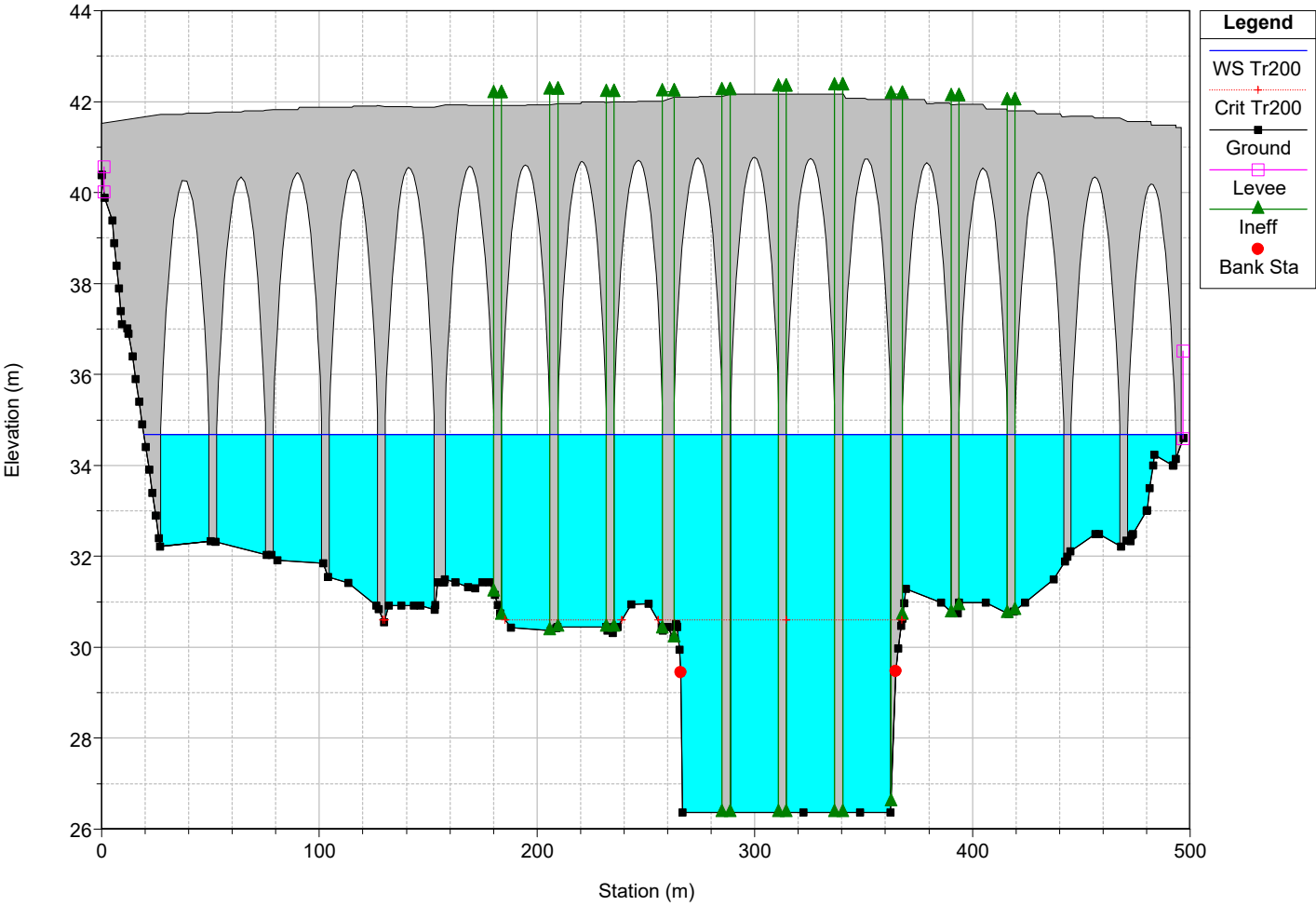
RS = 26 Livello Tr 200 anni POST OPERAM - Q = 2232 mc/s



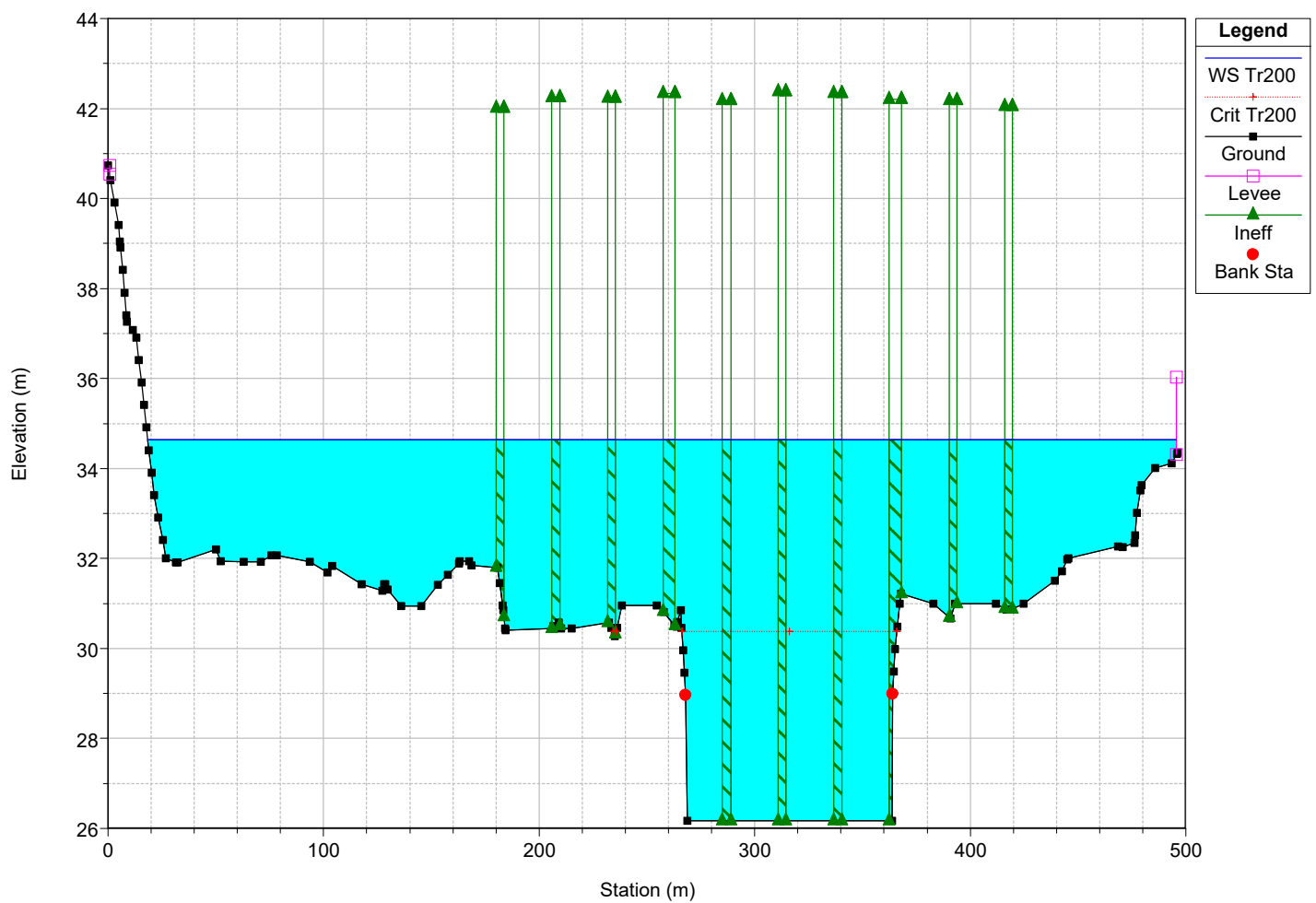
RS = 25 Livello Tr 200 anni POST OPERAM - Q = 2232 mc/s



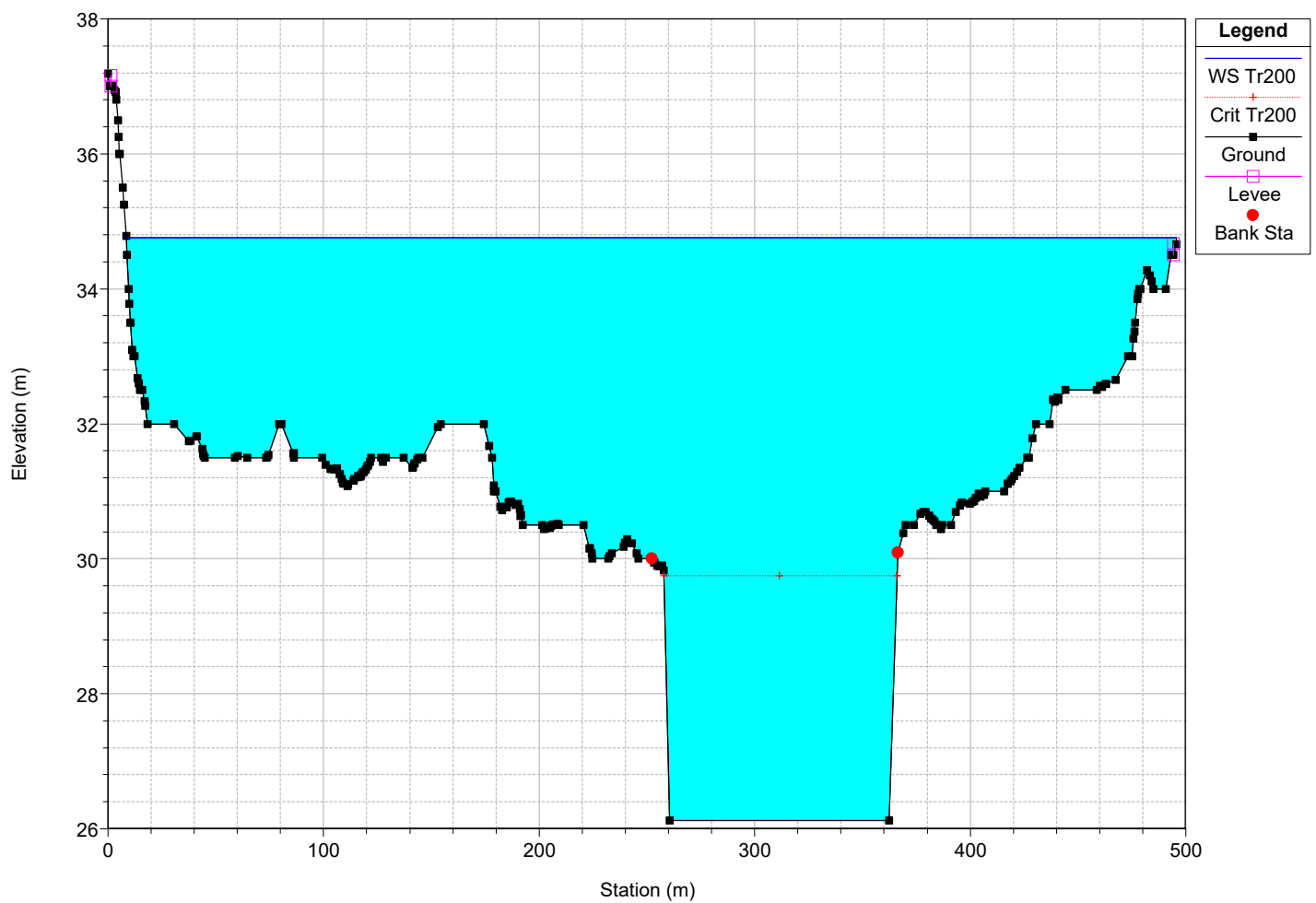
RS = 24.5 BR Livello Tr 200 anni POST OPERAM - Q = 2232 mc/s



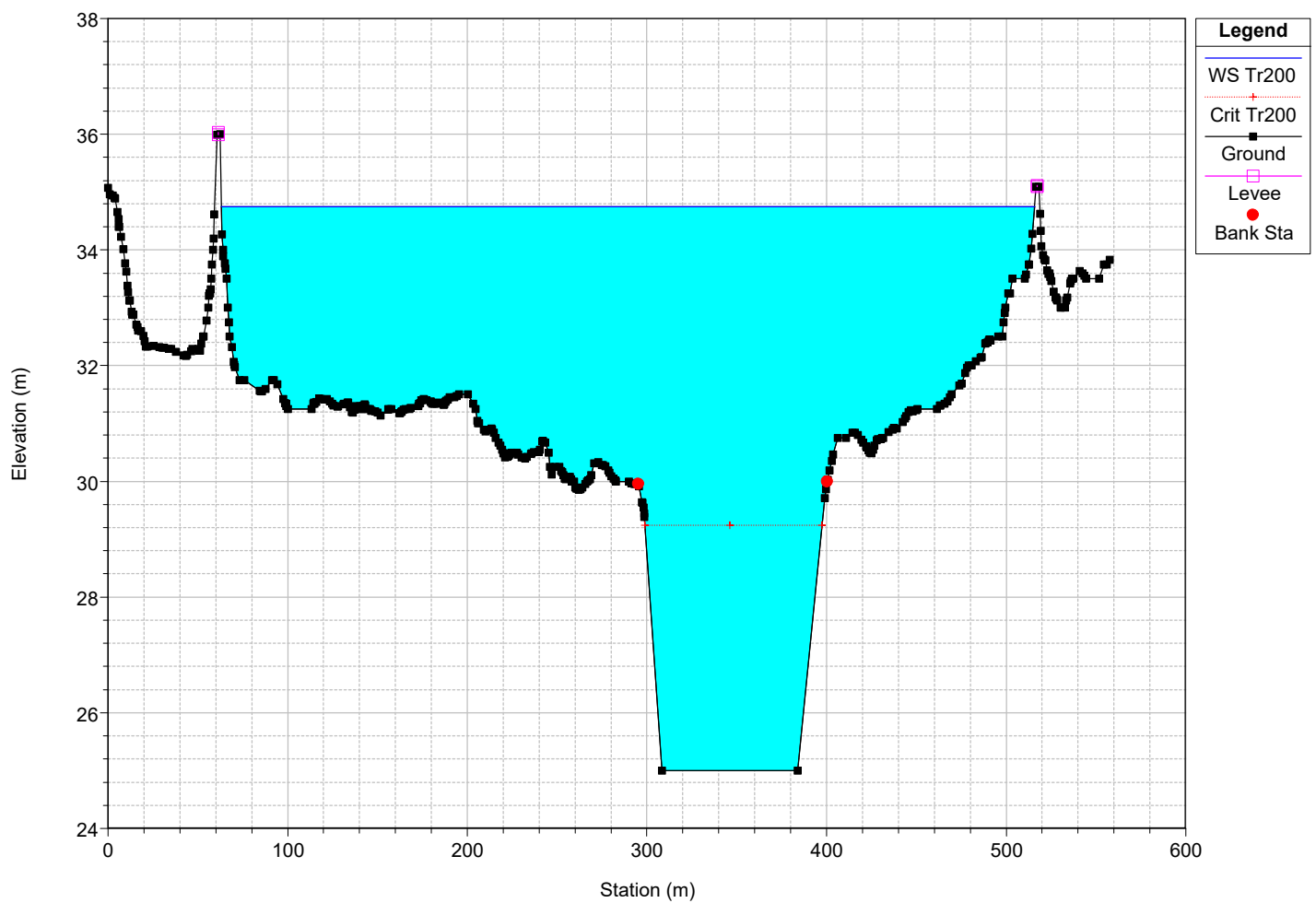
RS = 24 Livello Tr 200 anni POST OPERAM - Q = 2232 mc/s



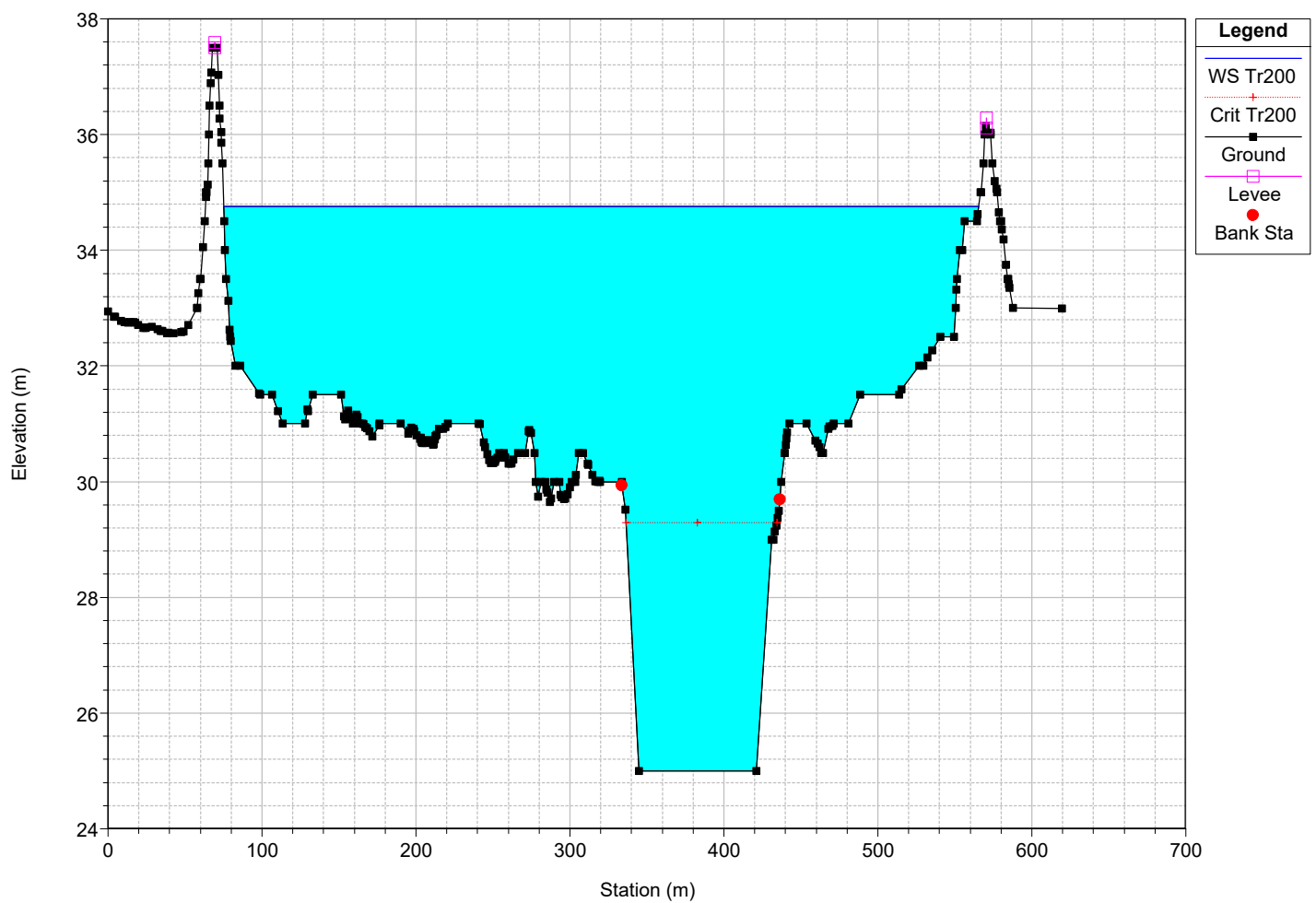
RS = 23 Livello Tr 200 anni POST OPERAM - Q = 2232 mc/s



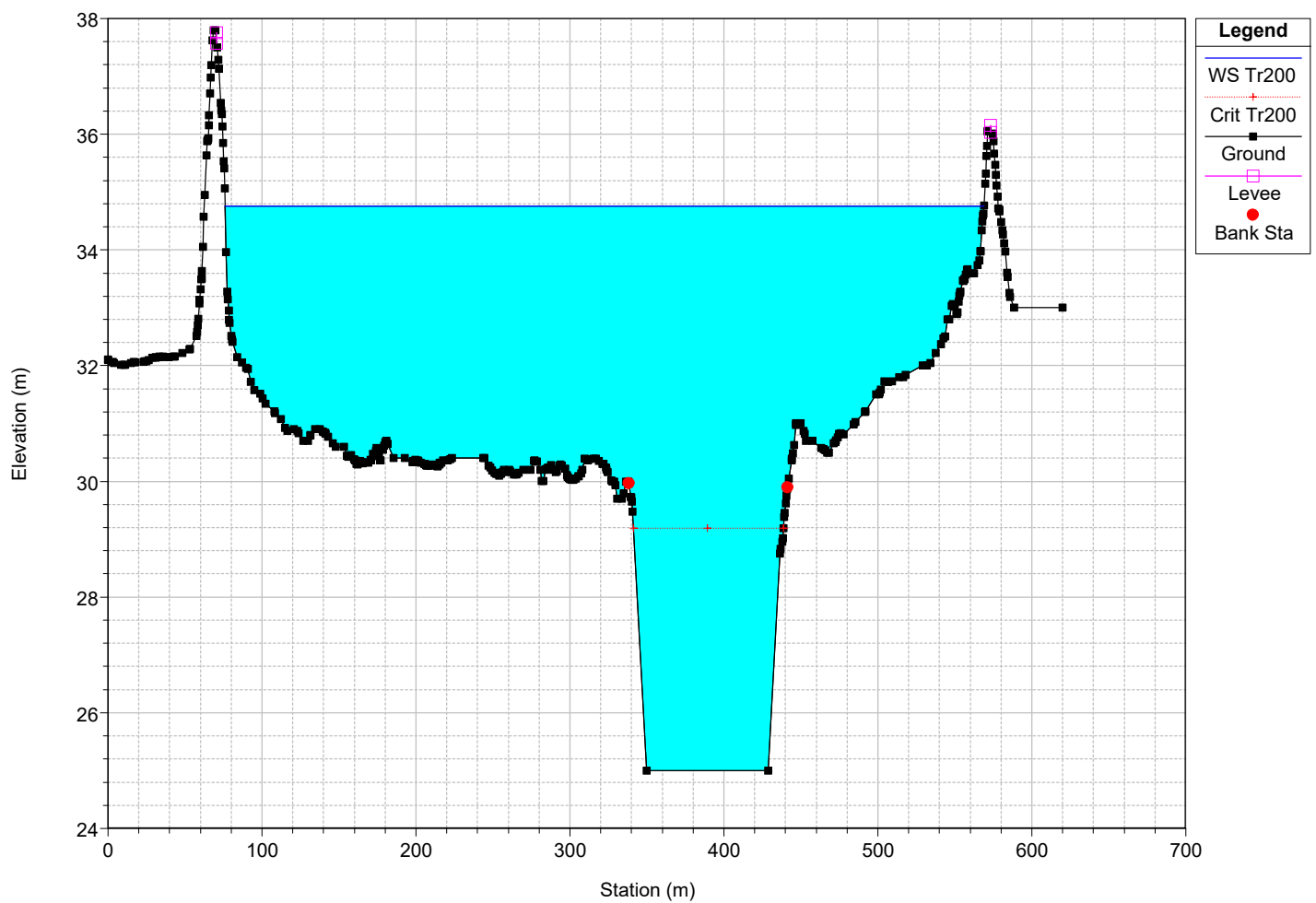
RS = 22.5 Livello Tr 200 anni POST OPERAM - Q = 2232 mc/s



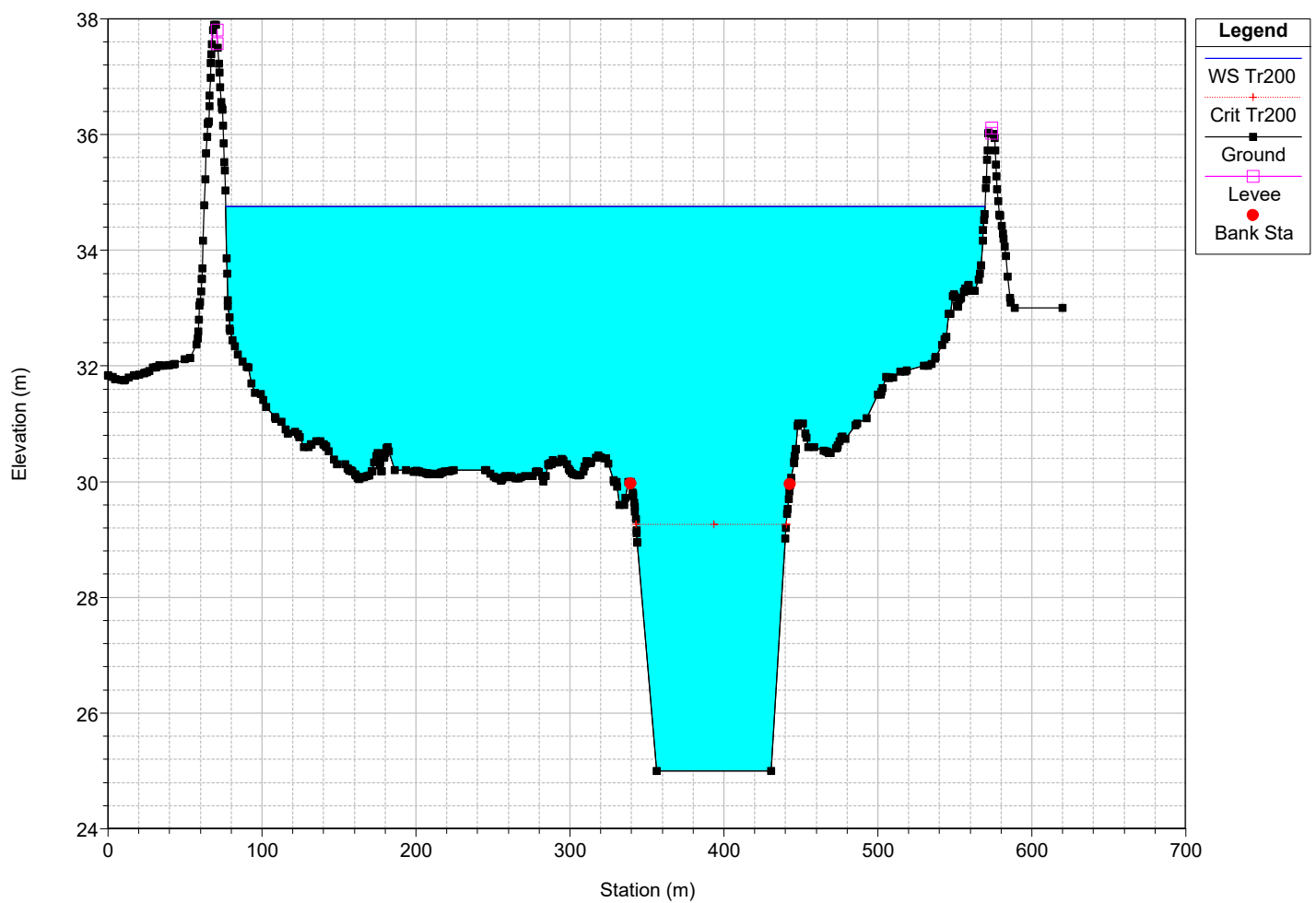
RS = 22 Livello Tr 200 anni POST OPERAM - Q = 2232 mc/s



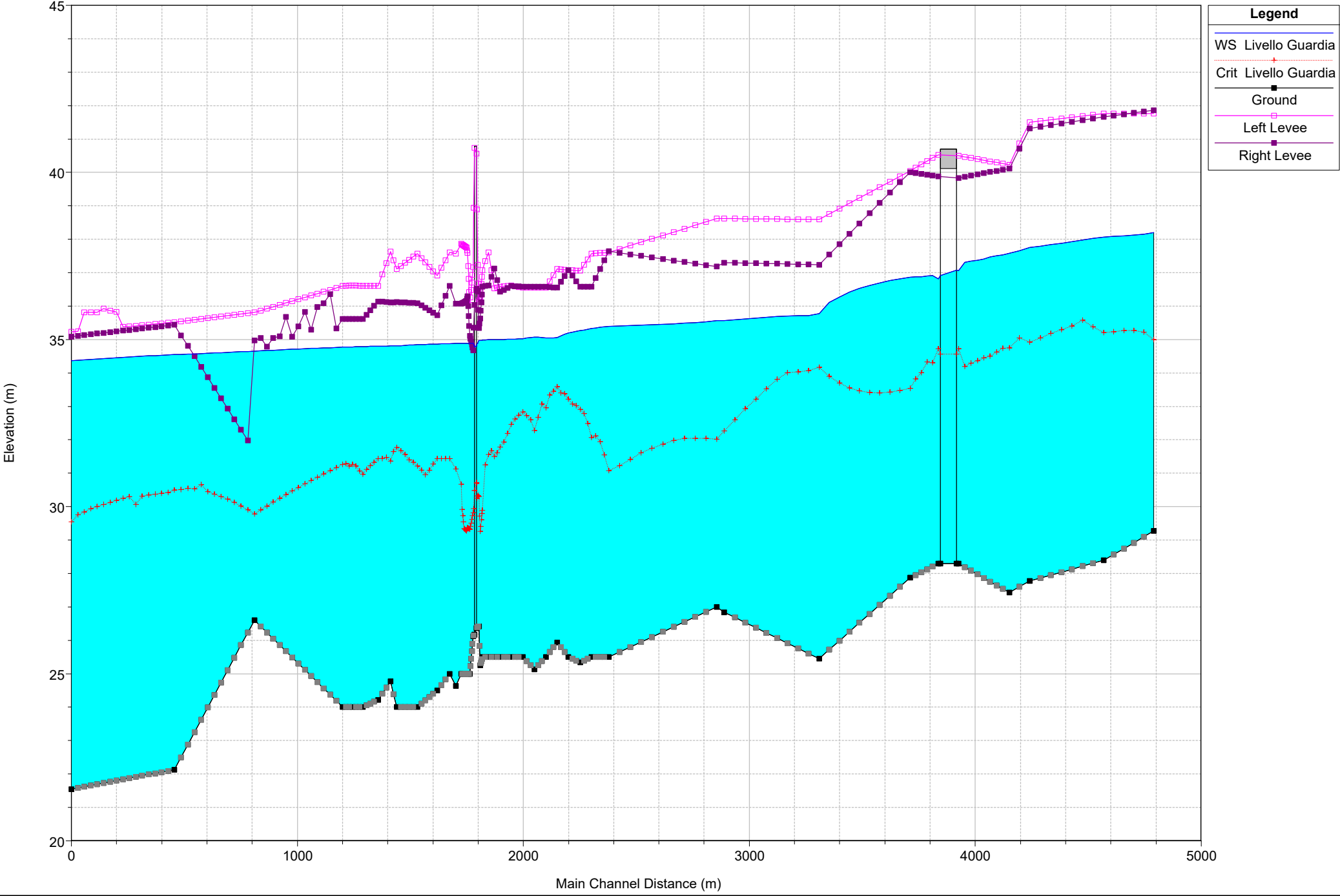
RS = 21.7 Livello Tr 200 anni POST OPERAM - Q = 2232 mc/s



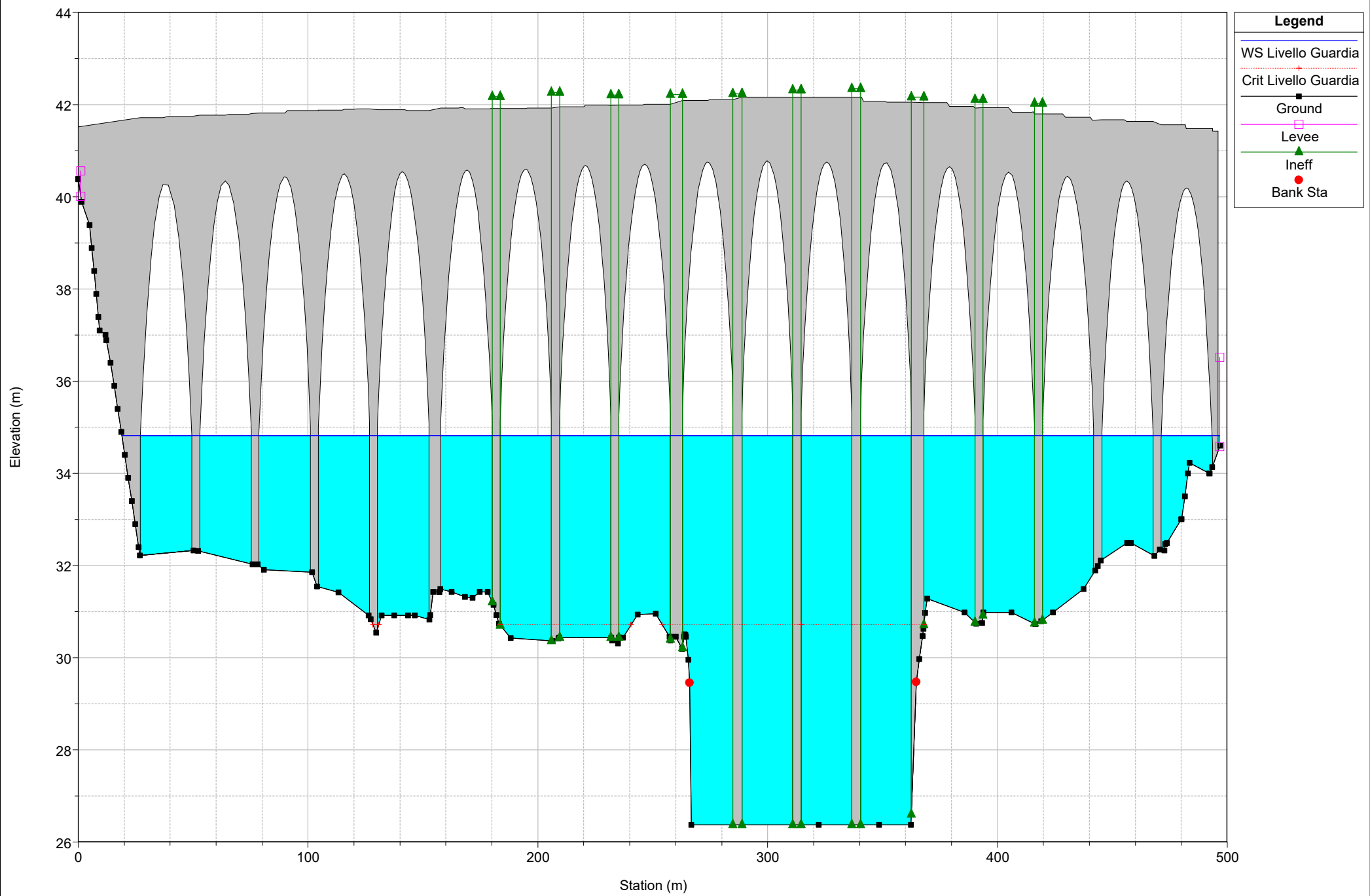
RS = 21.6 Livello Tr 200 anni POST OPERAM - Q = 2232 mc/s



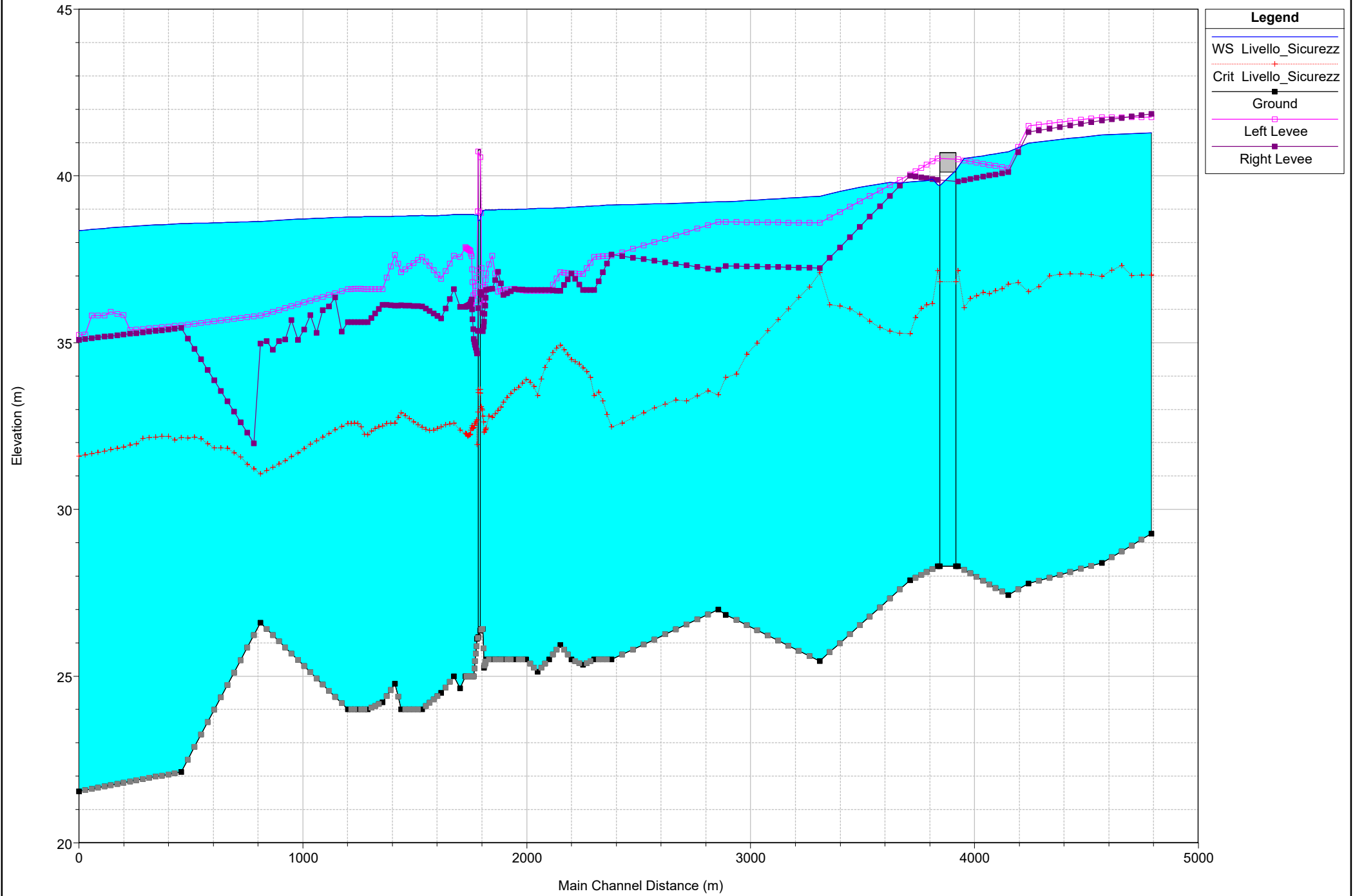
Livello guardia POST OPERAM - Q = 2300 mc/s



RS = 24.5 BR Livello guardia POST OPERAM - Q = 2300 mc/s



Livello sicurezza POST OPERAM - Q = 4900 mc/s



RS = 24.5 BR Livello sicurezza POST OPERAM - Q = 4900 mc/s

